

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

В.Г. Колобродов, І.В. Кравченко, В.І. Микитенко

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА КОНТРОЛЬ
АВТОМАТИЗОВАНИХ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

КИЇВ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Інтерсервіс
2021

УДК 681.7(02)
К61

*Рекомендовано до друку Вченою радою
КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 8 від 14.12.2020 р.)*

Рецензенти:

*В.Й. Котовський, д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського
В.М. Тягур, д-р техн. наук, КП Спеціального приладобудування «Арсенал»*

П79 Розроблення та контроль автоматизованих оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі / В. Г. Колобродов, І. В. Кравченко, В. І. Микитенко. – Київ: Інтерсервіс, 2021. – 170 с.

ISBN 978-966-999-095-2

Розглянуто теоретичні методи та схемотехнічні рішення засобів визначення енергетичних та просторових характеристик автоматизованих багатоканальних оптико-електронних систем дистанційного спостереження, запропоновані підходи до інформаційного узгодження окремих каналів цих систем.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

УДК 681.7(02)

ISBN 978-966-999-095-2

© В.Г. Колобродов, І.В. Кравченко,
В.І. Микитенко, 2021

Зміст

Перелік умовних позначень, одиниць, скорочень	4
Вступ	5
1 Сучасний стан БК ОЕСС та тенденції розвитку	11
1.1 Загальні характеристики і схеми побудови БК ОЕСС.....	11
1.2 Деякі тенденції розвитку БК ОЕСС і їх елементної бази.....	28
1.3 Комплексування в БК ОЕСС	37
2 Методи і засоби вимірювання параметрів та характеристик БК ОЕСС	43
2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС.....	44
2.1.1 Вимірювання функції передавання сигналу.....	49
2.1.1.1 Критерії оцінки методів вимірювання ФПС	52
2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання	53
2.1.1.3 Основні фотометричні співвідношення	79
2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС	82
2.1.2 Вимірювання зонної характеристики.....	107
2.1.3 Вимірювання спектральної характеристики	109
2.1.4 Вимірювальна установка	110
2.1.5 Похибки вимірювань.....	117
2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки.	118
2.2 Принципи побудови вимірювальних засобів для оцінки якості БК ОЕСС	127
2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС	130
2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС	141
2.2.3 Оцінка точності вимірювальних засобів.....	151
2.2.4 Вимірювальна установка	154
Висновки	158
Перелік посилань.....	162

Перелік умовних позначень, одиниць, скорочень

БК ОЕСС	-	багатоканальна оптико-електронна система
ПЗЗ	-	прилад з зарядовим зв'язком
ІЧ	-	інфрачервоний (а)
АЧТ	-	абсолютно чорне тіло
ФПМ	-	функція передачі модуляції
ФПС	-	функція передачі сигналу
СЩЕЯ	-	спектральна щільність енергетичної яскравості
ПВ	-	приймач випромінювання
БПВ	-	блок приймача випромінювання
ДВ	-	дифузний випромінювач
ОС	-	оптична система
ІВ	-	інтегральний випромінювач
СВ	-	спектральний випромінювач
ОПФ	-	оптична передаточна функція
ДЗЗ	-	дистанційне зондування Землі
ЦУР	-	центр ухвалення рішень
Гц	-	герц
Вт	-	ватт
мкм	-	мікрометр
мм	-	міліметр
м	-	метр
км	-	кілометр
с	-	секунда
мрад	-	мілірадіан
хв	-	хвилина

Вступ

Дана робота присвячена теоретичним засадам проєктування автоматизованих багатоканальних оптико-електронних систем спостереження (БК ОЕСС), які використовуються для моніторингу навколишнього простору. БК ОЕСС відрізняються від багатоспектральних ОЕСС тим, що вони поєднують в собі кілька окремих ОЕСС, які можуть працювати як в різних, так і в однакових спектральних піддіапазонах і навіть фізично знаходитись на різних платформах. Типові БК ОЕСС містять телевізійний і тепловізійний канали. Крім того, тепловізійний канал може складатися з каналів на різні інфрачервоні (ІЧ) піддіапазони, а телевізійний – доповнюватись низькорівневим каналом. Спільним у БК ОЕСС є електронний тракт і система візуалізації зображення (або система машинного зору, автоматичного розпізнавання тощо). Якщо ще донедавна такі ОЕСС розроблялись тільки в рамках військових програм, то зараз вони знайшли широке застосування в різних галузях науки і господарства. Цей процес розповсюдження високотехнологічних рішень супроводжується підвищенням вимог до них. Напрямки розвитку БК ОЕСС багато в чому базуються принципах функціонування зорового апарату людини. Вважається, що зоровий апарат взаємодіє з мозком двояко: шляхом передавання образу об'єкта для порівняння його з еталонами відомих образів (технічний аналог – оптико-електронні корелятори) або для аналізу образу по ряду первинних ознак (технічний аналог – ОЕСС із спектральною, просторово-частотною або просторово-часовою фільтрацією). Останніми роками виконуються численні розробки ОЕСС, що базуються на біонічних принципах. Такі системи часто використовують кілька паралельних каналів прийому і первинної обробки інформації.

Психофізіологічні дослідження показали, що оператор ОЕСС при аналізі зорових образів користується в основному принципом переваги тих або інших ознак. З цією метою оператор проводить зіставлення об'єктів

Вступ

одного класу, виділяючи їх спільність і відбираючи значимі (релевантні) ознаки. Особливістю психофізіологічних процесів сприйняття зорової інформації є просторова та часова декореляція зображень для усунення статистично надмірних зв'язків між сусідніми елементами зображення або послідовних кадрів. Це дозволяє використовувати тільки інформативні ознаки розпізнаваних образів і найбільш економно кодувати інформацію для передачі її в систему вторинної обробки - в мозок. Однією із стійких і самих інформативних ознак зображення є колір. Зоровий апарат людини має властивість колірної постійності, тобто здатність правильно розпізнавати різні кольори незалежно від спектрального складу джерела освітлення. Іншими особливостями зорового апарату людини є адаптивний «обмін» енергетичної чутливості ока на роздільну здатність завдяки накопиченню сигналу, що дозволяє суттєво стиснути інформацію і передавати в мозок тільки відомості про зміни ознак зображення [1].

Зважаючи на необхідність обробляти в реальному масштабі часу дуже великі об'єми інформації при вирішенні задач виявлення складних за формою, спектром та іншими ознаками зображень об'єктів, в сучасних ОЕСС звичайно використовується опис образів, який містить лише обмежене число релевантних ознак. Вибір релевантних ознак, які формують алгоритми обробки інформації в системі, є найважливішою задачею при розробці ОЕСС. Важливо відібрати мінімальне число таких ознак, що забезпечують задані показники якості роботи ОЕСС, але не ускладнюють їх конструкцію і не знижують надійність роботи систем.

Збільшення числа спектральних каналів ОЕСС хоча б до двох або трьох (як це відбувається в зоровому апараті людини) може помітно поліпшити їх ефективність. Наприклад, одночасне використання двох спектральних діапазонів (3 мкм ... 5 мкм і 8 мкм ... 13 мкм) істотно збільшує ймовірність правильного виявлення цілі на строкатих фонах в порівнянні з використанням тільки просторових ознак в поєднанні з обробкою сигналів в нейронній мережі [2].

Основними чинниками, які впливають на релевантні ознаки є зміна

Вступ

параметрів об'єкту і фону, зміна умов прийому сигналів від об'єктів і фонів, виникнення додаткових завад, зміна параметрів і характеристик самої ОЕСС, а одною з основних вимог до релевантних ознак є стійкість до вищезгаданих змін. По аналогії із зоровим сприйняттям, як інформативна ознака об'єктів для ОЕСС все частіше вибирається колір. Спектральне розділення БК ОЕСС залежить від кількості робочих спектральних піддіапазонів системи. Дуже важливим є питання про кількість таких піддіапазонів, яка необхідна для надійного розпізнавання. Відомо, що при зростанні числа спектральних піддіапазонів, точність розпізнавання зростає лише до певного моменту, а потім, при подальшому збільшенні цього числа, вона падає [3]. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа спектральних піддіапазонів необхідно виконувати оцінку множини статистик все більш високої розмірності по обмеженому фіксованому числу спектральних вибірок. При цьому помітно ускладнюється система обробки даних. Таким чином, існує оптимальне число спектральних піддіапазонів. Одним з напрямів подальшого розвитку багатоканальних ОЕСС є використання числа спектральних каналів, близького до суттєвої розмірності функцій, що описують спектральні випромінювальну і відбивну здатність об'єктів. Наприклад, в [3] стверджується, що суттєва розмірність багатоспектральних даних в діапазоні 0,4 мкм ... 15,0 мкм, яка характерна для процесів віддзеркалення і випромінювання електромагнітної енергії від поверхні Землі, є близькою до шести.

Відбір спектральних каналів проводиться за принципом виділення такого робочого діапазону роботи ОЕСС, в якому відношення "сигнал/шум" є максимальним. Враховуючи можливі зміни ефективної спектральної випромінювальної здатності об'єкту або спектральної густини освітленості зображення, зв'язані, наприклад, із зміною режиму роботи об'єкта, або із зміною умов проходження оптичного сигналу на трасі «об'єкт - ОЕСС», або із зміною умов освітлення об'єкту природними сторонніми джерелами тощо, доцільно мати гнучкі еталони спектральних ознак – спектральних відносин. В цьому випадку модель еталона стає інваріантною

Вступ

по відношенню до випадкових або детермінованих варіацій ознак сигналу в певних межах або діапазонах зміни вказаних чинників.

Енергетичне розділення як число рівнів яскравості об'єкту або освітленості в зображенні вибирається відповідно до необхідного відношення "сигнал/шум". При цьому слід враховувати взаємозв'язок просторового, спектрального і енергетичного розділення, що існує в реальних ОЕСС. Наприклад, якщо високий просторове розділення досягається шляхом зменшення розмірів елемента зображення, то через це на даний елемент попаде менша кількість енергії, яка необхідна для розділення її по спектральних піддіапазонах і отримання необхідного відношення "сигнал/шум" в кожному з цих піддіапазонів. Тому дуже важливими є задачі вимірювання енергетичних і просторових характеристик БК ОЕСС і їх калібрування.

Створення БК ОЕСС супроводжується вирішенням трьох основних питань:

- розроблення апаратної частини в складі багатоканального приймального блоку, аналогово-цифрового блоку перетворення інформації і аналізу, засобу візуалізації, допоміжних систем (калібрувальних, компенсаційних, систем підтримання заданих режимів, тощо);
- розроблення програмно-апаратних засобів комплексування і обробки інформації в ОЕСС;
- розроблення методик досліджень енергетичних та просторових характеристик ОЕСС і створення атестаційних та калібрувальних засобів.

Розробка принципово нових спектральних каналів ОЕСС наразі відноситься до фундаментальних розробок в області фізики твердого тіла та напівпровідників. Деякі розробки, наприклад, ОЕСС ультрафіолетового діапазону (200 нм ... 300 нм) на базі гібриду електронно-оптичного підсилювача та ПЗЗ-матриці вже вийшли на стадію практичної реалізації і

Вступ

потребують технологічних доопрацювань.

Друга задача має двояке вирішення - шляхом використання оптичних засобів та з допомогою цифрової обробки інформації. Оптичними засобами здійснюється попередня обробка інформації – просторова, спектральна, частотна фільтрація або автоматичний аналіз зображення для виявлення та розпізнавання об'єктів. Принципи і алгоритми, що лежать в основі оптичних методів, розробляються багато років в оптико-електронному приладобудуванні і призначені для обробки інформації в кожному з каналів, тобто є одноканальними. Стосовно БК ОЕСС оптичні системи використовуються для сполучення візирних осей каналів, що є досить тривіальним питанням і має чисто інженерне вирішення. Цифрова обробка інформації в багатоканальних системах забезпечує максимальну гнучкість алгоритмів і є одним з ключових елементів в забезпеченні ефективного функціонування сучасних БК ОЕСС. В цій галузі виконується величезний обсяг досліджень математиками та фахівцями з цифрових технологій.

Актуальність розв'язання третьої задачі природно виникла після вводу в експлуатацію перших зразків БК ОЕСС. Виявилось, що ті методики і метрологічне устаткування, які використовувались для вимірювання характеристик ОЕСС з єдиним робочим спектральним піддіапазоном, нездатні відтворити весь діапазон вхідних сигналів і виміряти з достатньою точністю вихідний сигнал. Ситуація ускладнилась ще більше після початку масового використання БК ОЕСС для дистанційного зондування Землі з космосу: в цьому випадку діапазон змін вхідних величин суттєво зріс порівняно з наземними системами. На сьогодні розробка методик та засобів вимірювання енергетичних і просторових характеристик є однією з найважливіших задач в напрямку обґрунтування принципів створення БК ОЕСС. Хоча досі в світі не існує стандартних методик вимірювання основних характеристик БК ОЕСС, особливо гостро ця проблема стоїть в Україні, яка має досить розвинене оптико-електронне приладобудування, але не має атестаційних методик та засобів.

Монографія частково вирішує задачу створення в Україні методик та

Вступ

засобів вимірювання енергетичних і просторових характеристик БК ОЕСС відповідно до сучасного світового рівня розвитку в цій галузі.

В першому розділі з метою визначення номенклатури параметрів, які необхідно вимірювати, і діапазонів зміни цих параметрів проаналізовані схеми побудови окремих каналів БК ОЕСС, визначені тенденції розвитку БК ОЕСС, принципи узгодження окремих каналів БК ОЕСС виходячи з сучасних уявлень про комплексування інформації. Другий розділ присвячений методикам та засобам вимірювань енергетичних характеристик. Запропоновані методи і засоби вимірювання функції передачі сигналу, зонної характеристики, спектральної характеристики. Особливу увагу приділено відтворенню одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості. Третій – методикам та засобам вимірювань просторово-частотних характеристик БК ОЕСС. Запропоноване технічне рішення визначення функції передачі модуляції по пограничній кривій.

1 Сучасний стан БК ОЕСС та тенденції розвитку

1.1 Загальні характеристики і схеми побудови БК ОЕСС

БК ОЕСС використовуються для спостереження за різними процесами, що відбуваються на Землі, у її атмосфері, для спостереження позаземних об'єктів. Найбільш представницьким класом БК ОЕСС є системи дистанційного зондування Землі. Вони виконують такі основні задачі:

- дослідження кліматичних змін, прогнозування клімату;
- контроль хімічного складу атмосфери, контроль озонового шару;
- прогнозування погоди;
- оцінка і прогноз стану сільськогосподарських культур, пасовищ, лісів, ґрунтів, внутрішніх водойм і сніжного покриву;
- вивчення і картування геологічних структур з метою виявлення перспективних для перебування корисних копалин районів;
- дослідження і контроль біопродуктивності океану і континентального шельфу, виявлення зон рибальського промислу;
- спостереження за льодовим покривом у полярних областях для забезпечення судноплавства;
- контроль і прогноз розвитку циклонів і ураганів забезпечення безпеки судноводіння і господарської діяльності в тайфунебезпечних районах;
- спостереження у військових цілях;
- екологічний моніторинг:
- контроль забруднень атмосфери, ґрунтів, вод, рослинності;
- контроль екологічно небезпечних районів;
- контроль за переміщенням небезпечних вантажів.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Основними задачами БК ОЕСС для дослідження позаземних об'єктів є:

- вивчення метеоритних потоків, метеорної речовини і комет;
- вивчення зірок і туманностей;
- вивчення сейсмології Сонця і його складу;
- дослідження динамічних процесів на Сонці для створення теорії і методів їхнього прогнозування;
- вивчення поверхні планет Сонячної системи та ін.

Аналіз відомих і перспективних БК ОЕСС слід зосередити в класі систем дистанційного зондування Землі космічного базування по причині найбільш жорстких вимог до характеристик таких систем і найбільш широких діапазонів зміни вхідних сигналів. Сучасні вимоги до якості інформації (особливо щодо оперативності її отримання), яку мають забезпечити БК ОЕСС космічного базування, потребують використання не одного, а групи пристроїв. Відповідно, космічні держави створюють оптико-електронні комплекси, до складу яких входять окремі БК ОЕСС.

На американських метеорологічних супутниках серії NOAA встановлюється багатоспектральний радіометр високого розділення AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Космічні апарати NOAA запускаються на полярні орбіти висотою біля 700 км над поверхнею Землі з нахилом 98,89 градусів. Радіометр високого розділення веде зйомки поверхні Землі в п'яти спектральних діапазонах: 580 нм - 680 нм, 725 нм - 1100 нм, 3550 нм - 3930 нм, 10300 нм - 11300 нм і 11400 нм - 12400 нм. Космічні зйомки проводяться з просторовим розділенням 1100 м і забезпечують смугу огляду шириною 2700 км.

Океанографічні російські супутники серії "РЕСУРС-01" забезпечують отримання багатозональної космічної інформації високого і середнього просторового розділення [4]. Параметри орбіти супутника "РЕСУРС-01": кругова сонячно-синхронна орбіта висотою 678 км, період обігу 98 мін з

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

нахилом 98,04 градусів. До складу бортового інформаційного комплексу входять БК ОЕСС видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів з такими характеристиками:

- видимий канал високого розділення МСУ-Е з просторовим розділенням 35 м х 45 м. Смуга огляду складає 45 км, зйомка здійснюється в 3 спектральних каналах 500 нм - 600 нм, 600 нм – 700 нм і 800 нм - 900 нм;
- видимий та ІЧ канал середнього розділення МСУ-СК з просторовим розділенням 150 м х 250 м. Смуга огляду досягає 600 км. Зйомка проводиться в 5 спектральних каналах: 500 нм - 600 нм, 600 нм -700 нм, 700 нм - 800 нм, 800 нм -1100 нм і 10400 нм - 12600 нм.

Розміри відеозображення складають 1000 елементів на 1100 рядків для МСУ-Е і 1800 елементів на 1500 рядків для МСУ-СК.

У бувшому Радянському Союзі для дослідження природних ресурсів Землі в останні роки успішно використовувалися супутники "Метеор-Природа". Штатною апаратурою цих супутників є радіотелевізійний комплекс РТВК у складі: дубльованого комплексу багатоканальних оптико-механічних скануючих пристроїв малої (БК ОЕСС-М) і середньої (БК ОЕСС-С) роздільної здатності, запам'ятовувальних пристроїв і двох радіосистем метрового й дециметрового діапазонів.

Обладнання, супутника "Метеор-Природа" вміщує в себе:

- бортовий інформаційний комплекс БІК-Е в складі: багатозонального скануючого пристрою середнього розділення БК ОЕСС-СК з конічним оптико-механічним розгорненням зображення, багатозонального скануючого пристрою високої роздільної здатності з електронним розгорненням БК ОЕСС-Е, виконаного на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), і цифрової радіосистеми;
- експериментальну багатоканальну систему високої роздільної здатності "Фрагмент" у складі: оптико-механічного скануючого

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

пристрою, системи кодування и обробки інформації та цифрової радіосистеми. Основні параметри цих комплексів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Параметри бортових комплексів "Метеор"

Параметри	Комплекс				
	БК-Е		"Фрагмент"		
	БК ОЕСС-Е	БК ОЕСС- СК			
Поле огляду, км (для висоти польоту 650км)	30	600	85	1400	2000
Розміри проекції польової діафрагми на земну поверхню в надирі, м	30	170	80	240	1000
Спектральні діапазони, мкм	0,5-0,7	0,5-0,6	0,4 - 0,8	0,5-0,7	0,5-0,6
	0,7 - 0,8	0,6-0,7	0,5-0,6	0,7-1,0	0,6-0,7
	0,8 - 1,0	0,7-0,8	0,6 - 0,7		0,7-0,8
		0,8 - 1,0	0,7 - 0,8		0,8-1,0
			0,7 - 1,1		
			12 - 1,1		
			1,5- 1,8		
			2,1-2,4		

Сучасна космічна гідрометеорологічна система "Метеор-3" [5] забезпечує глобальний екологічний моніторинг території Росії. Параметри

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

орбіти супутника "Метеор": приполярна кругова орбіта висотою близько 1200 км, нахил 82,5 градуси. Комплекс наукової апаратури дозволяє оперативно 2 рази на доба одержувати зображення хмарності і підстилаючої поверхні у видимому і інфрачервоному діапазонах. До складу бортового комплексу супутника входять скануючий десятиканальний ІЧ-радіометр з просторовим розділенням 35 км x 35 км (спектральний діапазон 9,65 мкм - 18,7 мкм, смуга огляду 400 км), а також ІЧ-радіометр для глобального огляду і передачі даних на АППІ з просторовим розділенням 3 км x 3 км (спектральний діапазон 10,5 мкм - 12,5 мкм, смуга огляду 3100 км).

Параметри приладів БК ОЕСС-СК та БК ОЕСС-Е наведені в табл. 1.2.

У МСУ-СК (рис. 1.1) випромінювання від підстилаючої поверхні під кутом 39° до вертикалі збирається сферичним дзеркалом і направляється на один з чотирьох каналів 2, розташованих на скануючому пристрої 3, який обертається навколо вертикальної вісі. У кожному оптичному каналі виділяється сигнал, що відповідає одному телевізійному елементу розкладання, і направляється до спектроділильної системи 4. У фотоприймачах 5 утворюється відеосигнал, що після формування в підсилювачах 6 надходить на вихід приладу. За один оберт скануючого пристрою 3 проглядаються чотири рядки, що представляють собою дуги кола з центральним кутом $\approx 66^\circ$. Калібрування каналів відбувається як по внутрішньому еталону, так і по Сонцю.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Таблиця 1.2 - Параметри скануючих систем комплексу БК-Е

Параметри	БК ОЕСС- СК	БК ОЕСС-Е
Смуга огляду, км (для висоти польоту 650 км)	600	30
Розмір елемента розкладу на місцевості в надирі, м:		
по рядку	175	28
по кадру	243	28
Кут сканування, град	66,5	2,5
Кут нахилу лінії візування, град	38,9	0
Швидкість сканування, рядків/с	48	218
Ефективність розгортки	0,74	0,91
Кількість елементів в активній частині рядка	3614	1000
Кількість спектральних каналів	4	3
Діаметр вхідної зіниці об'єктиву, мм	200	87,5
Маса, кг	47	17

У багатоканальному скануючому пристрої БК ОЕСС-Е використовуються лінійні приймачі випромінювання на базі ПЗЗ із 1024 елементами в рядку. Зображення підстилаючої поверхні, за допомогою об'єктива 1 (рис. 1.2) через спектроділильну систему 2 проєкціюється на три лінійки ПЗЗ 3, кожна з яких працює у певному спектральному діапазоні. Потім відеосигнал надходить на блоки посилення і формування 4 і на вихід приладу. Всі лінійки розташовуються перпендикулярно до напрямку польоту. По рядку лінійки здійснюється електронне сканування, по кадру розгорнення здійснюється за рахунок руху супутника. Лінійки ПЗЗ охолоджуються до -30 °С... -50 °С за допомогою радіаційного кріостата.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Інформація від БК ОЕСС-СК і БК ОЕСС-Е реєструється на фототелеграфних пристроях з форматами кадрів $600 \text{ мм}^2 \times 480 \text{ мм}^2$ та $240 \text{ мм}^2 \times 300 \text{ мм}^2$ відповідно.

Система "Фрагмент" забезпечує розгорнення зображення земної поверхні впоперек траси польоту в смузі $\approx 85 \text{ км}$ одночасно у восьми діапазонах видимої та ближньої ІЧ-області оптичного спектра, перетворення прийнятого випромінювання в електричний сигнал, порівняння цього сигналу з еталонним, перетворення сигналу в цифрову форму, супровід основного сигналу інформацією про стан підсистем, режими їхньої роботи, введення сигналів синхронізації та формування телеметричного кадру.

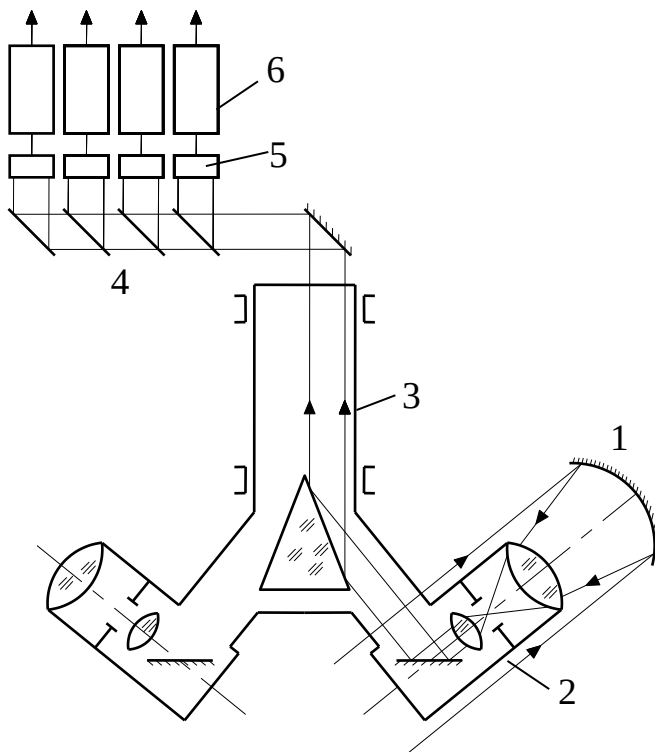


Рисунок 1.1 - Функціональна
схема БК ОЕСС-СК

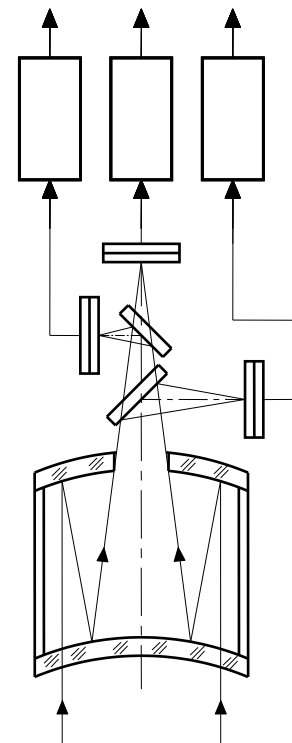


Рисунок 1.2 - Структурна схема
БК ОЕСС-Е

Система "Фрагмент" працює по відбитому сонячному випромінюванню. Траєкторія сканування – пряморядкова траєкторія, для

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

якої при кутах візування до 15° перспективні перекручування лінійного миттєвого поля зору не перевищували 3,5 % по вісі «у» и 6,5 % по вісі «х» (напрямок польоту). Зміни оптичного шляху в атмосфері при візуванні в надир та на край смуги огляду не перевищують 3,5 %. Скануючим елементом є розташоване перед об'єктивом одногранне металоскляне дзеркало. ККД сканування становить приблизно 0,65.

Випромінювання від земної поверхні надходить на скануюче дзеркало, збирається об'єктивом і фокусується на аналізуючих польових діафрагмах, якими є вхідні торці світловодів волоконно-оптичного розгортувача. Світловоди передають випромінювання на смугові спектральні фільтри. Після фільтрів сигнали надходять на фотоперетворювачі (фотоприймач + підсилювач), які перетворюють випромінювання в електричні сигнали, амплітуди яких пропорційні яскравості земної поверхні у видимому спектральному діапазоні. Електричні сигнали кодуються і надходять у систему передавання даних.

Під час розвороту скануючого дзеркала в початкове положення оптико-механічний комутатор спочатку перекриває потік, що йде на вхідні торці світловодів, а потім пропускає на ці торці випромінювання від опорного джерела, спектр якого близький до спектра Сонця. Сигнали, які формуються на виходах фотоперетворювачів, трансформуються в кодуємому пристрої і порівнюються з нульовим і фіксованим опорним рівнями сигналів. Величини неузгодженості порівнюваних сигналів і зазначених рівнів використовуються для вироблення керуючих сигналів у ланцюзі зворотного зв'язку, що здійснює автоматичну корекцію апаратурних адитивних і мультиплікативних завад відеотракту.

Основні параметри системи "Фрагмент" наведені нижче:

- ширина смуги огляду 85 км;
- темп зйомки $590 \text{ км}^2/\text{с}$;
- ширина інформаційного каналу $5,6 \cdot 10^6 \text{ біт/с}$;

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

- загальна кількість каналів 35;
- площа входної зіниці 358 см²;
- маса 280 кг;
- енергоспоживання 220 Вт;
- габаритні розміри 1000 мм × 140 мм × 730 мм.

Об'єктив системи "Фрагмент", розрахований і виготовлений підприємством "Карл Цейсс", (Ієна НДР), побудований за схемою Касегрена з кільцевою входною зіницею діаметром 240 мм і фокусною відстанню 1 м.

На довжині хвилі $\lambda = 0,5$ мкм діаметр кружка розсіювання становить $\rho_{аб} \approx 0,03$ мм, а на інших робочих довжинах хвиль $\rho_{аб} \leq 0,13$ мм. Для усунення температурного розфокусування приймальної оптичної системи передбачена система термокомпенсації, що ефективно працює в діапазоні температур від -40°C до $+20^{\circ}\text{C}$.

Миттєве поле зору показане на рис. 1.3. Воно складається з восьми стовпців (по кількості робочих спектральних діапазонів). При такій конфігурації поля відеосигнал кожного i -го спектрального діапазону, що відповідає одній і тій же точці досліджуваної поверхні, зсунеться за часом відносно сигналу в першому спектральному діапазоні на величину

$$\Delta t_i = \frac{\Delta \delta_i}{v_y},$$

де $\Delta \delta_i$ – відстань вздовж вісі сканування між центрами першого та i -го стовпців, v_y – швидкість сканування. Для перенесення випромінювання від діафрагм до приймачів у системі "Фрагмент" використаний волоконно-оптичний розгалужувач.

В якості фотоприймачів в каналах 1–4 використані фотопомножувачі ФЭУ-114, у каналі 5 – ФЭУ-112, у каналах 6 и 7 – фотодіоди ФД-8, у каналі 8 – фоторезистор ФС-2АН.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Для калібрування системи та корекції систематичних помилок використовуються опорний випромінювач, спектральна характеристика випромінювання якого близька до спектра чорного тіла з $T = 6000$ К, ланцюг компенсації. Ланцюг складається з блока кодування та фотоперетворюючої ланки та здійснює за рахунок компенсації дрейфу нуля й зміни крутизни перетворення автоматичну корекцію внесених апаратурних помилок. Коригувальні сигнали виробляються по відхиленнях темнового сигналу і сигналу опорного випромінювача від нульового і опорного рівнів відповідно. Оскільки швидкість дрейфу в тракті перетворювача значно більше, ніж зміна оптичних властивостей скануючої системи й оптичного тракту, опорний випромінювач і комутатор розміщені після оптичної системи.

Системи БК ОЕСС-М і БК ОЕСС-С є оптико-механічними скануючими пристроями з однорядковим розгорненням і з одноеlementними приймачами. Деякі параметри систем наведені в табл. 1.3. Через змінну роздільну здатність на місцевості уздовж рядка, яка викликана перспективними перекичуваннями та кривизною поверхні, роздільна здатність на краю рядка в БК ОЕСС-М гірше майже в 4 рази, ніж у центрі, а в БК ОЕСС-С – в 2,5 рази.

У БК ОЕСС-М сканування виконується шляхом прокачування дзеркала за допомогою кулачкового механізму (рис. 1.3, а), а в БК ОЕСС-С воно здійснюється шляхом обертання дзеркальної піраміди (рис. 1.3, б). В обох системах використовується об'єктив ОКС-4-75 СА з фокусною відстанню 75 мм і діаметром входної зіниці 18,75 мм. У фокальній площині об'єктива 1 установлені діафрагми, що формують миттєве кутове поле відповідно до необхідної роздільної здатності на місцевості.

У системі БК ОЕСС-М випромінювання після спектродільника 2 розділяється на видиме й інфрачервоне. Видиме випромінювання проходить через діафрагму 3, конденсор 4 і розділяється інтерференційними дзеркалами-світлоділками 5, 6 і 7 на три частини відповідно ділянкам спектра (0,5-0,6) мкм; (0,6-0,7) мкм й (0,7-0,8) мкм. У

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

якості фотоприймачів 8, 9 і 10 використовуються фотопомножувачі типу ФЕУ-114. В інфрачервоному каналі 0,8-1,0 мкм застосовується фотопомножувач ФЕУ-112. У системі БК ОЕСС-С використовується лавинний фотодіод.

Таблиця 1.3 - Параметри системи БК ОЕСС

Параметри	БК ОЕСС-М	БК ОЕСС-С
Роздільна здатність на місцевості в надирі, км		
По напрямку польоту	1,7	0,142
Уздовж рядка	1	0,24
Кут сканування	106	90
Смуга захвату, км	1930	1380
Число елементів в активній частині рядка	1880	5700
Швидкість сканування, рядків/с	4	48
Кількість спектральних каналів	4	2
Маса з урухомником, кг	4,5	5,5

Реєстрація результатів вимірів, проведених за допомогою цих систем, ведеться на стандартній фототелевізійній апаратурі. Для БК ОЕСС-М вони фіксуються на фотоплівці форматом 240 мм × 300 мм роздільно для кожного спектрального каналу. Для БК ОЕСС-С розмір фотознімка становить 600 мм × 480 мм. Один сеанс запису (6 хв) охоплює район близько 1930 мм × 2500 км.

На штучному супутнику Землі оперативної системи спостереження "Ресурс-01" в якості датчиків дистанційного зондування встановлені багатоканальні скануючі пристрої двох типів: оптико-електронні високого

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

розділення БК ОЕСС-Е та оптико-механічні середнього розділення БК ОЕСС-СК.

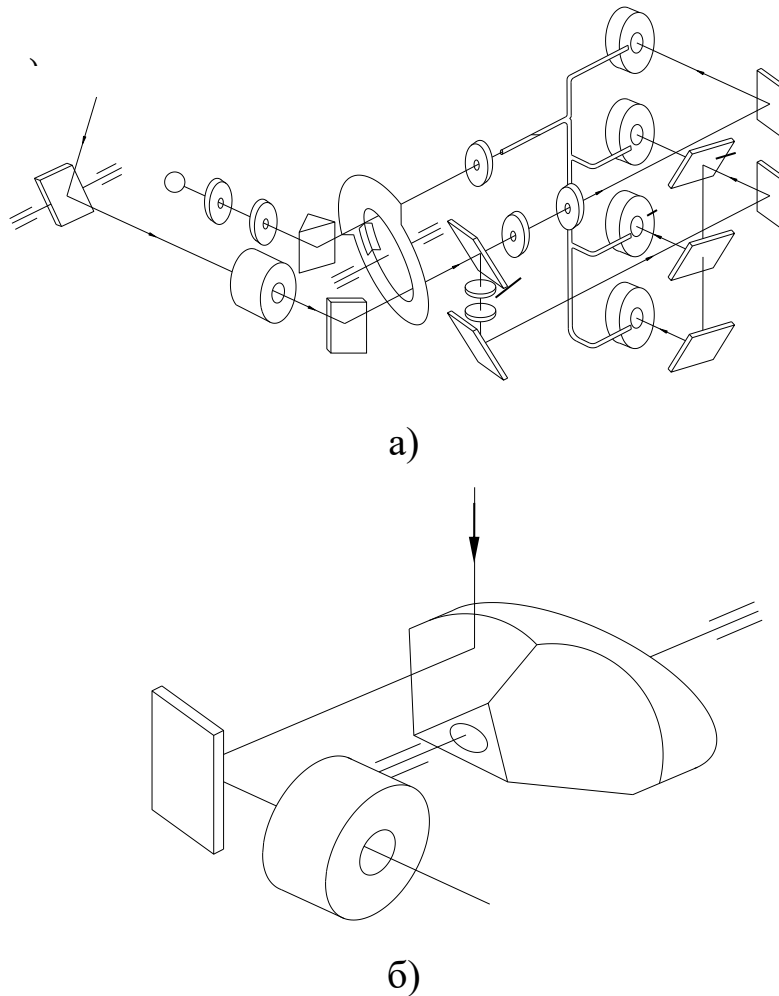


Рисунок 1.3 - Схеми скануючої системи а) БК ОЕСС-М; б) БК ОЕСС-С

Спрощена оптична схема сканера БК ОЕСС-Е зображена на рис. 1.4.

В оптичну схему входить дзеркально – лінзовий об'єктив "Зуфар-2СА", який містить головне дзеркало 1, додаткове дзеркало 2, меніск 3, корегуючі лінзи 5, лінзи 8, 9, 10 для корекції астигматизму, поворотне дзеркало 4, інтерференційні спектродільники 6, 7, ПЗЗ-лінійки 11 і канал внутрішнього калібрування, що містить дзеркало 12, об'єктив 13, прозору пластину 15, діафрагму 17, послаблюючі фільтри 14, 16, джерело світла 18.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Об'єктив 13 має фокусну відстань $f=75,2$ мм і відносний отвір 1:4. Переведення БК ОЕСС-Е з режиму прийому інформації в режим калібрування здійснюється поворотом дзеркала 4.

Миттєве поле зору, що відповідає елементу ПЗЗ уздовж напрямку польоту, дорівнює $5,9''$ і впоперек напрямку польоту - $7,1''$. Відстань між центрами сусідніх елементів - $14,2''$.

Діаметр входної зіниці об'єктива – $87,5$ мм.

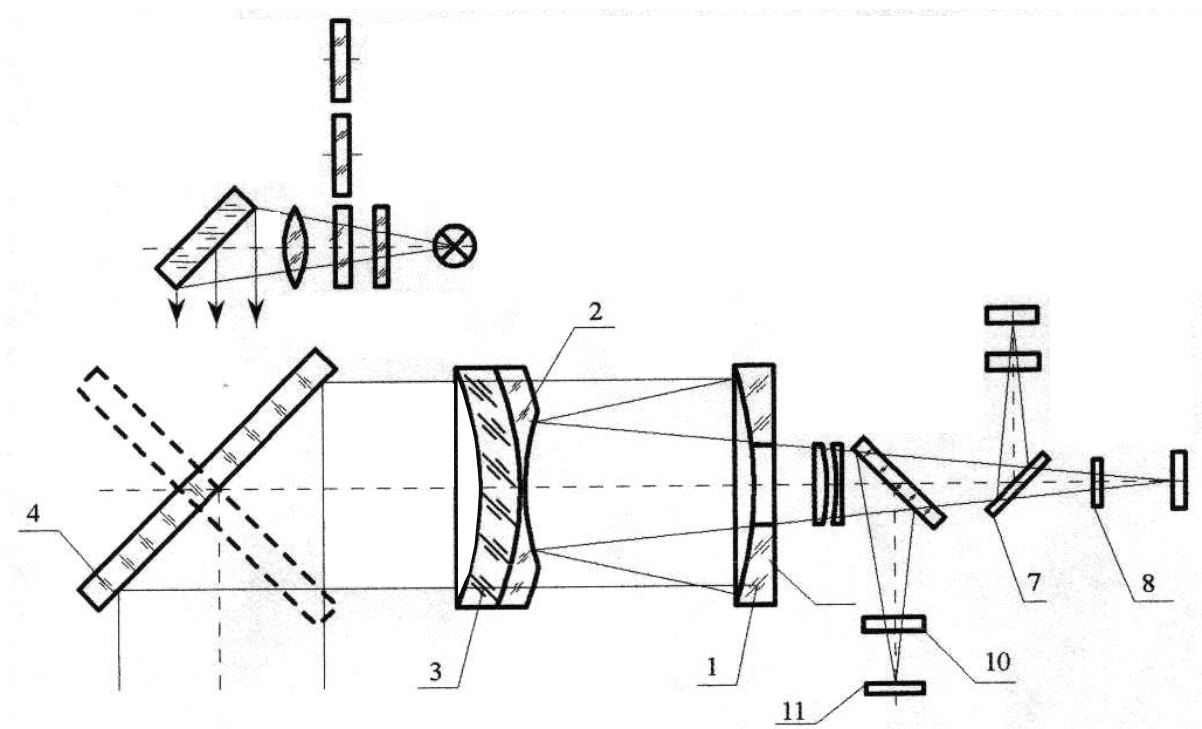


Рисунок 1.4 - Оптична схема сканера БК ОЕСС-Е

На космічному апараті "Океан - О" [6] був використаний багатоспектральний скануючий пристрій високого просторового розділення БК ОЕСС-В.

Урухомник сканування призначений для приведення в коливальний рух скануючого дзеркала навколо двох взаємно-перпендикулярних напрямків з ціллю формування кадрів в межах заданого кута огляду без пропусків і накладання. Для сканування використовується прямий та зворотний напрямки руху дзеркала, під час яких здійснюється лінійна

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

рядкова розгортка й утворюються два скани: непарний (НС) та парний (ПС) відповідно. Під час робочої частини скану у вимірювальний відеотракт надходять потоки випромінювання від досліджуваних об'єктів, а в неробочій частині скану – від калібрувальних джерел. Комутація потоків випромінювання у вимірювальний відеотракт в робочій та неробочій частинах сканів у певній послідовності виконується за допомогою диска калібрування. Принцип синхронної та синфазної роботи диска калібрування зі скануючим дзеркалом забезпечується збігом моментів механічного перекриття (або відкриття) потоку випромінювання від досліджуваних об'єктів та закриття (або відкриття) вимірювального тракту електронним способом з певними положеннями коливання скануючого дзеркала.

В неробочій частині НС відбувається калібрування семи спектральних зон (видима та ближня ІЧ-область): джерело випромінювання для вироблення сигналу рівня "чорного" являє собою чорнену поверхню на диску калібрування, а рівень "білого" забезпечується за допомогою освітлювальної лампи марки КГМН-12-20. В неробочій частині ПС здійснюється калібрування 8-ї спектральної зони (теплова ІЧ-область) з допомогою випромінювачів, що створюють сигнали рівня "холодного" (АЧТ з термоелектричним охолоджувачем при температурі до 223 К) та рівня "гарячого" (АЧТ при температурі 320 К), які перекривають заданий динамічний діапазон роботи. Всі зазначені джерела випромінювання входять до складу блока калібрування БК2 і використовуються для автоматичної корекції дрейфу нуля та регулювання підсилення в каналах.

Оптична система БК ОЕСС-В складається зі скануючого дзеркала, вхідного об'єктива, волоконно-оптичного блока (ВОБ) та оптичних модулів спектральних зон. Скануюче дзеркало має еліптичну форму (розміри по великій та малій півосям 410 мм та 260 мм відповідно) та покрите відбивною плівкою з алюмінію. Двохдзеркальний вхідний об'єктив виконаний по схемі Касегрена (варіант Річі – Кретьєна) і призначений для фокусування зображення досліджуваних об'єктів у

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

головній фокальній площині. Відбивні поверхні головного та вторинного дзеркал (діаметра 260 мм і 130 мм відповідно) мають срібне покриття.

Вхідні торці ВОБ, який має 15 світловодів (10 волокон з номінальним діаметром 66 мкм і 5 волокон діаметром 132 мкм), розташовані в головній фокальній площині, а вихідні торці узгоджені з оптичними елементами, що підводять випромінювання до фотоприймачів перших шести спектральних зон. Випромінювання до фотоприймачів 7-ї (2,1 мкм – 2,35 мкм) спектральної зони і 8-ї (10,4 мкм – 12,6 мкм), які мають дві та п'ять чутливих площадок відповідно, від головної фокальної площини передається за допомогою дзеркально-лінзової оптичної системи, що містить у своєму складі дихроїчні дзеркала та інтерференційний світлофільтр для формування вказаних спектральних зон. Фотоприймач 7-ї спектральної зони охолоджується за допомогою термоелектричного холодильника, а зниження температури в чутливих площадках фотоприймача 8-ї спектральної зони досягається за допомогою мікрокріогенної системи МСМГ-7Г-18/80.

Для перетворення променистої енергії в електричний сигнал у каналах перших п'яти спектральних зон БК ОЕСС-В застосовані кремнієві фотодіоди, в шостій – германієві фотодіоди, а в сьомій та восьмій – фоторезистори на основі CdPbS та CdHgTe відповідно.

До складу апаратури БК ОЕСС-В входить також ряд вузлів і блоків, необхідних для збирання та обробки службової інформації, стабілізації режимів роботи, а також система управління та контролю. Для забезпечення живлення стабілізованою напругою всіх електронних блоків передбачена система вторинних джерел електроживлення, яка складається з основного та вторинного блоків.

Іншим прикладом ефективного використання багатоканальних ОЕСС є неодноразово описані в літературі системи американських супутників серії Ландсат. Супутник Ландсат-3 був запущений у березні 1978 р. Його багатоканальна скануюча система MSS мала п'ять спектральних каналів:

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

0,5 мкм-0,6 мкм; 0,6 мкм-0,7 мкм; 0,7 мкм-0,8 мкм; 0,8 мкм-1,1 мкм й 10,4 мкм-12,6 мкм, однак останній канал через чотири місяці експлуатації вийшов з ладу й робота системи велася в основному у видимій області спектра. Просторове розділення на місцевості для перших чотирьох каналів складало 80 м при ширині смуги огляду 185 км. Інформативність системи становить 108 біт/с. Маса MSS близька до 100 кг, споживана потужність 65 Вт.

Оптична схема MSS представлена на рис. 1.5, а. Сканування здійснюється за допомогою коливного дзеркала, розташованого в паралельному пучку променів перед об'єктивом типу Касегрена з фокусною відстанню $f' = 820$ мм. Об'єктив обладнаний блендою. Зображення за допомогою волоконно-оптичної системи ділиться на 24 частини (рис. 1.5, б). Потік випромінювання від кожної частини надходить по волокнах на відповідний приймач. Кожен спектральний канал включає шість приймачів випромінювання. Організація волоконно-оптичної системи така, що в кожному спектральному каналі здійснюється паралельне сканування. Розмір миттєвого поля одного приймача на місцевості становить 76 м $\times$ 76 м. Інтервал між елементами в напрямку польоту дорівнює 5 м на місцевості. За період сканування на місцевості проглядається смуга шириною 484 м і довжиною 185 км. Сканування здійснюється з частотою 13,62 Гц, при цьому має місце 10-метрове перекриття смуг (при швидкості польоту 6,46 км/с).

Для супутника Ландсат-Д створена модифікація MSS, призначена для тематичного картографування, яка має сім спектральних діапазонів: 0,48 мкм - 0,52 мкм; 0,52 мкм - 0,6 мкм; 0,63 мкм - 0,69 мкм; 0,76 мкм - 0,90 мкм; 1,55 мкм - 1,75 мкм; 2,15 мкм - 2,35 мкм; 10,4 мкм - 12,6 мкм. Просторова роздільна здатність у перших чотирьох діапазонах становить 30 м, в інших 120 м.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

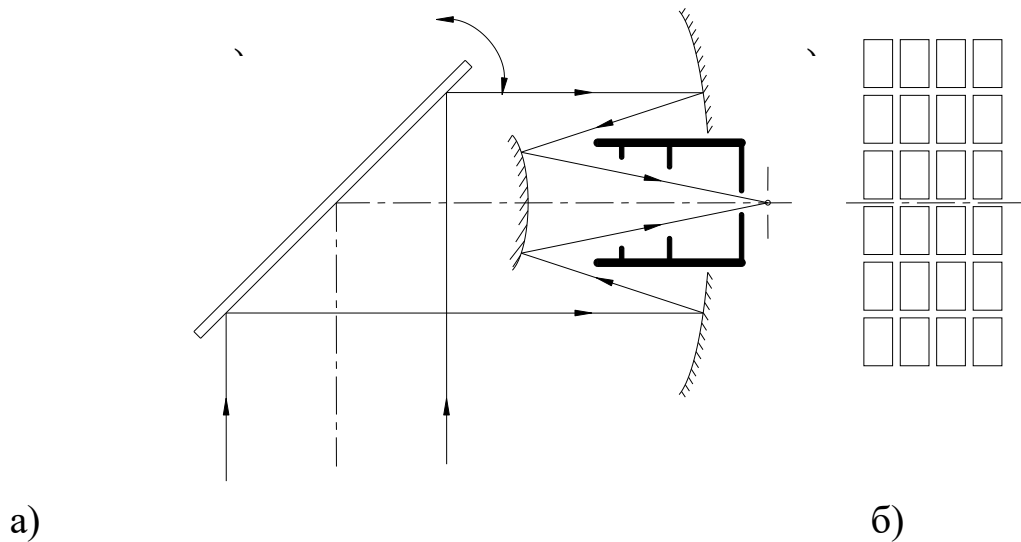


Рисунок 1.5 - Багатоканальна скануюча система MSS: а – оптична схема; б – розташування вхідних торців оптичних волокон

На супутниках Ландсат є також комплекти кадрових телевізійних камер RBV. У комплект RBV Ландсат-3 входять дві камери на відиконах, що працюють у спектральному діапазоні $0,505 \text{ мкм} - 0,750 \text{ мкм}$ та забезпечують розділення близько 40 м при кадрі $98 \text{ км} \times 98 \text{ км}$.

Поряд з оптико-механічними системами, установлюваними на космічних апаратах, триває розробка цих систем для спостереження з борта літаків і вертольотів. Бортовий радіометр, що працює у видимому й ближньому ІЧ діапазонах (від $0,4 \text{ мкм}$ до 1 мкм), який розділяють на вісім спектральних каналів із середньою шириною смуги пропускання 20 нм . Розрахункова еквівалентна шуму спектральна щільність енергетичної яскравості цього радіометра становить $(0,001 - 0,02) \text{ мкВт/см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм}$. У довгохвильовому ІЧ діапазоні температурна роздільна здатність $\Delta T_{\text{пор}} = 0,5 \text{ К}$. Миттєве кутове поле радіометра дорівнює $0,113^\circ$; кількість елементів розкладу в рядку 703. При висоті польоту 3 км розмір елемента розкладання становить $6,1 \text{ м}$ (на осі системи), а ширина спостережуваної смуги на Землі дорівнює 3651 м . Дальність дії системи становить $2,7 \text{ км} - 3,6 \text{ км}$. У льотних випробуваннях радіометра, проведених в 1979 р., гранична чутливість у смузі $\Delta \lambda = 20 \text{ нм}$ склала

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

(0,015 – 0,03) мкВт/см²·ср·нм.

Прикладом ОЕСС, що працює активним методом, є лазерний локатор (лідар), встановлюваний на борту вертольота, який служить для виявлення родаміна В (RhВ) у воді по його флюоресценції. Система на базі потужного імпульсного лазера з енергією 1 Дж, що працює на довжині хвилі 536 нм, дозволяє виявити концентрацію RhВ менш, ніж 10⁻¹⁰ г/см³. Об'єктив системи має вхідну зіницю діаметром 200 мм, фокусна відстань 1 м.

1.2 Деякі тенденції розвитку БК ОЕСС і їх елементної бази

Порівнявши дані, опубліковані за останні роки, можна відмітити ряд основних загальних тенденцій, властивих розробкам нових бортових багатоканальних ОЕСС. До них належать:

- розширення спектрального робочого діапазону й збільшення числа окремих спектральних каналів усередині цього діапазону;
- збільшення динамічного діапазону вимірів;
- зменшення помилок вимірів; збільшення енергетичної, спектральної і просторової роздільної здатності;
- збільшення швидкодії систем первинної й вторинної обробки інформації;
- перетворення первинної інформації в цифрову форму та її фільтрацію на борту носія оптико-електронної апаратури;
- здійснення калібрування системи в процесі вимірів;
- скорочення тривалості циклів спостереження одних і тих самих районів з 18-20 до 2-3 днів;
- можливість одержання стереозображень;
- багатофункціональність систем, тобто сполучення в одній системі функцій радіометра, спектродіаметра, тепловізора;
- поява систем, що працюють активним методом;

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

- уніфікація оптико-електронної апаратури, призначеної для рішення різних завдань по дослідженню природних ресурсів.

Дуже важливим є оптимізація узгодження між параметрами ОЕСС і системами вторинної обробки та інтерпретації одержуваної інформації. Для одержання максимуму інформації при візуальній інтерпретації, звичайно, потрібно не більше 64 градації яскравості (6 біт), однак при використанні цифрової обробки з метою тематичного картографування потрібно 8-бітове розділення (256 градацій), що еквівалентно енергетичному розділенню близько 0,4 %. Звідси ясно, що тільки ОЕСС з інструментальною помилкою в десяті частки відсотка від максимального значення вимірюваної величини (яскравості, температури тощо) можуть успішно використовуватися для відмітної класифікації природних утворень.

Прагнення до зменшення втрат інформації при проходженні сигнала через ланки ОЕСС, тобто до зменшення випадкової помилки вимірів, веде до необхідності кодування сигнала шляхом перетворення його з аналогової форми в цифрову. Бажано це кодування виконувати якнайближче до вхідної ланки ОЕСС, тобто в її перших ланках.

Одним зі шляхів рішення перерахованих вище завдань є використання багатоелементних матричних або мозаїчних приймачів. У літературі неодноразово відзначалися їхні достоїнства, зокрема можливість виключення складних механічних скануючих вузлів, збільшення швидкодії ОЕСС, можливість збільшення часу перебування зображення на одному елементі приймача, що збільшує чутливість і відношення "сигнал/шум", геометричну стабільність системи й ряд інших. Однак варто пам'ятати й про зростаючу складність калібрування великої кількості елементарних приймачів (тисяч або десятків тисяч), компенсації їхніх шумів і дрейфу параметрів, ускладнення електронного каналу.

Використання ПЗЗ-лінійок і матриць дозволяє розрізняти перепади відбивної здатності $\Delta\rho_{\text{пор}} = 0,005$, тобто 0,5%, при відношенні "сигнал/шум" порядку 50-100 (у видимому й ближньому ІЧ-діапазонах при коефіцієнтах

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

відбиття $\rho = 0,1 - 0,5$ і середній енергетичній яскравості порядку $(2 - 25)$ Вт/м²·ср. У роботі [7] проведений розрахунок сигналу, який є еквівалентним шуму, ПЗЗ-лінійки для гіпотетичної системи з діаметром вхідної зіниці 30 см, фокусною відстанню 105 см, миттєвим кутовим полем 14,3 мкрад, коефіцієнтом пропускання оптичної системи з фільтром - 0,3 і часом накопичення сигналу $1,5 \text{ с} - 10^{-3} \text{ с}$. Граничний сигнал склав $(1,6 - 2,2) \times 10^6$ Дж/м², що досягне при сучасній технології ПЗЗ-структур. Така система зможе розрізняти на місцевості ділянки розміром близько 10 м.

Великі перспективи відкриваються перед розробниками ОЕСС після розробки промислових зразків ПЗЗ-приймачів, а також гібридних систем з використанням матриці або мозаїки фотоприймачів і ПЗЗ-системи, чутливих в ІЧ діапазоні, особливо в діапазоні 8 мкм - 14 мкм [8].

Варіанти схемотехнічного рішення [9] з використанням матричних приймачів на діапазон 0,4 мкм - 15 мкм зображені на рис. 1.6. У кожному із двох каналів (ab і cd), які працюють в піддіапазонах 0,4 мкм - 2,4 мкм і 3,2 мкм - 14 мкм, є скануючі дзеркала 1, об'єктиви 2, 4, щілинні діафрагми 3, світлодільники (дихроїчні дзеркала) 5, диспергуючі елементи (дифракційні ґрати) 6, матричні приймачі випромінювання 7. Дзеркала 1 можуть бути нерухомими, якщо дистанційне зондування йде з невеликих висот.

У цих схемах зображення, яке вирізає щілина, розкладається в спектр. Отриманий кадр зчитується матричним приймачем. Кожен рядок кадру відповідає зображенню однієї й тієї ж вузької смуги сканованої поверхні в певній області спектра, тобто число спектральних піддіапазонів дорівнює числу рядків фотоматриці.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

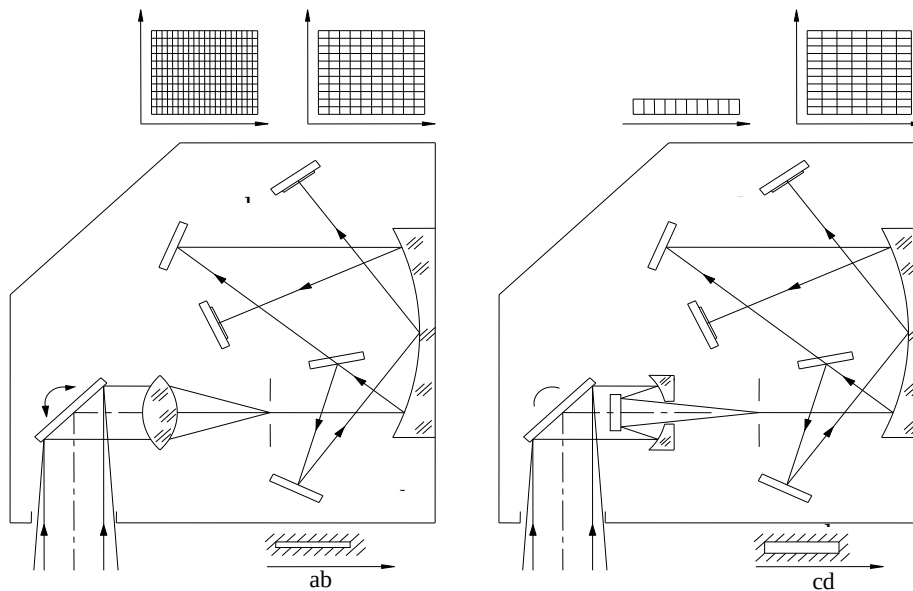


Рисунок 1.6 – Схематехнічні рішення двоканальних ОЕСС

У склад космічних систем для дослідження природних ресурсів як правило входять багатозональні скануючі пристрої високого розділення з розміром елемента розкладання на місцевості 50 м у видимій частині спектра і не гірше 200 м - в ІЧ діапазоні при смузі огляду 180 км - 200 км у межах 0,4 мкм -12,5 мкм. Періодичність огляду становить в середньому декілька діб.

У французькій супутниковій системі SPOT (System Probatoire d'Observation de la Terre), призначеній для отримання метеорологічної, геологічної, географічної й екологічної інформації використовуються ПЗЗ-лінійки, розташовані впоперек напрямку польоту, тобто паралельне сканування. Це дозволяє збільшити час перегляду кожного елемента підстилаючої поверхні і забезпечити високу фотограмметричну якість знімків уздовж осі лінійного сканування, а також відмовитися від всіх механічних рухомих вузлів: скануючого дзеркала, механічних дискових модуляторів і т.п. Основні параметри SPOT наведені в табл. 1.4.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Таблиця 1.4 - Основні параметри радіометра системи SPOT

Параметр	"Кольорові" канали	Чорно-білий канал
Роздільна здатність на місцевості, м	20	10
Час зчитування ПЗЗ-лінійки, мс	3	1,5
Спектральні діапазони, мкм	0,5 - 0,59	
	0,61 - 0,68	
	0,79 - 0,89	0,51 - 0,73
Число енергетичних роздільних градацій	256 (8 біт)	
Швидкість обробки даних Мбіт/с	25	
Ширина оглядової смуги в надирі, км	0±45	
Поле обзору впоперек напрямку польоту		± 29,23°
Відповідна полю обзору зона огляду, км	±475	
Число установок візирних осей	через 0,6	

Перед коректором розташовується плоске дзеркало, що може бути повернуте в кожне з 91-го положення усередині кута $\pm 29,23^\circ$. Біля фокальної площини об'єктива розташовані три дихроїчні призмові розгалужувачі, призначені для поділу спектральних каналів, а також чотири світлоділні призми для точного суміщення чотирьох прийомних лінійок у єдиний рядок сканування.

Розділення на місцевості в 10 м у межах смуги в 60 км вимагає використання лінійки з 6000 елементів. Для цього застосовуються ПЗЗ-лінійки з роздільною здатністю 13 мкм і розкидом чутливості й коефіцієнтів підсилення в кожному з елементарних приймальних каналів не більше $\pm 7\%$. На борту супутника відбувається періодичне калібрування системи по лампі і по Сонцю, під час якого автоматично вимірюються темновий струм і коефіцієнт підсилення в кожному елементарному каналі. Чутливість системи дозволяє реєструвати зміни в коефіцієнтах відбиття підстилаючої поверхні порядку 0,05 (5 %) при кутах піднесення Сонця над

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

обрієм більше 30° .

По команді, що надходить через телеметричний канал, оптична вісь кожного із двох приладів, що утворюють SPOT, може бути встановлена в одному з 91-го можливих положень у межах $\pm 29^\circ$ з дискретністю $0,6^\circ$. В "нульовому" центральному положенні осі приладів розгорнуті на $0,163^\circ$ щодо надира, так, що перекриття на землі становить 3 км. У зв'язку з перспективними перекручуваннями, збільшенням оптичної товщі повітряної маси на шляху похилих променів і рядом інших факторів роздільна здатність на краях кутового поля (на краях оглядової смуги шириною $950 \text{ км} \pm 50 \text{ км}$) падає на 35 % у порівнянні з надиром. На краях "коридору" в 200 км погіршення роздільної здатності відбувається всього на 2 %.

Роботи з підвищення точності бортового калібрування радіометрів, що має головне значення для зменшення систематичної помилки виміру температури радіометром, ведуться в напрямку створення еталонного бортового випромінювача з автоматичною високоточною стабілізацією його температури випромінювання. Це дозволило б створити автоматичне регулювання зміни коефіцієнта передавання радіометра й збереження сталості значень коефіцієнтів передавання, отриманих при лабораторному калібруванні, тобто незалежність каліброваного графіка радіометра від часу функціонування радіометра при вимірах. Очевидні тенденції до поєднання в одному приладі функцій радіометра й спектро радіометра. Це властиво ряду вже розроблених й описаних вище систем, у яких видимий і ближній ІЧ діапазони розділяються на велике число вузьких піддіапазонів, а середньохвильовий ІЧ діапазон береться в межах усього атмосферного вікна прозорості 8 мкм - 14 мкм або значної його частини. Випромінювання від досліджуваних об'єктів попадає на скануюче обертове дзеркало (рис. 1.7), що направляє його на дзеркало 2 приймального об'єктива. За допомогою дзеркал 3 й 4 потік надходить на дихроїчний фільтр-світлодільник 5. На призми 6 й 7 монохроматора направляється видиме й короткохвильове ІЧ-випромінювання, що, будучи розкладеним у

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

спектр після об'єктива 8 і фільтра 9, попадає на охолоджуваний багатоеlementний приймач випромінювання 10. Кожний з елементів приймача чутливий лише у вузькій спектральній області. Довгохвильове ІЧ-випромінювання за допомогою компонента 11 збирається на охолоджуваний приймач 12, поміщений у дюар.

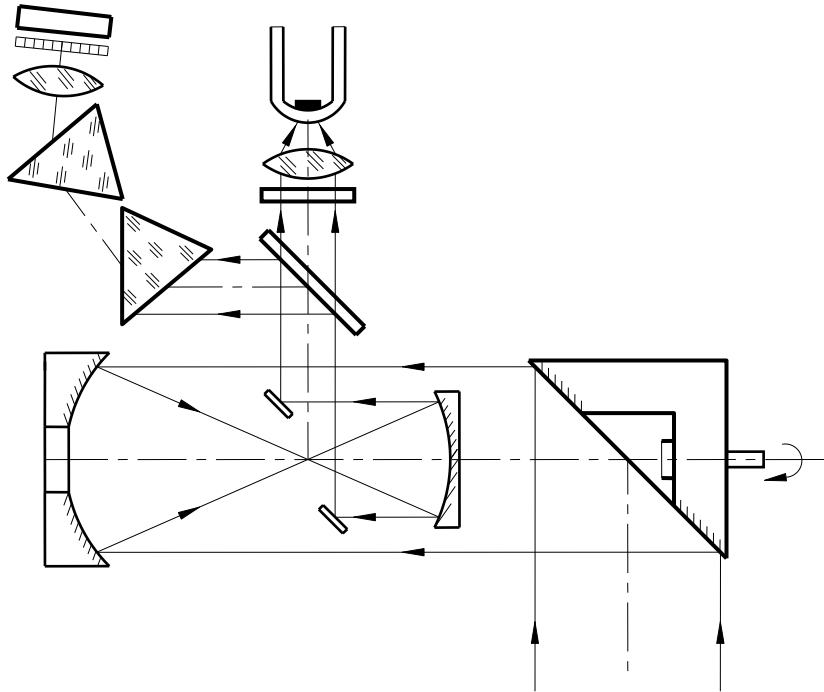


Рисунок 1.7 - Схема скануючого спектрорадіометра

Основною частиною будь-якої ОЕСС є об'єктив. На практиці завжди доводиться шукати оптимальне рішення як з погляду надійності й стабільності конструкції об'єктива, забезпечення мінімальних втрат світлового потоку в ньому, забезпечення мінімальної маси й габаритів сканера, так і виходячи з вимог забезпечення потрібної якості зображення.

Об'єктиви можна розділити на три великі групи: лінзові, дзеркальні й дзеркально-лінзові.

Лінзові об'єктиви також діляться на ряд типів, наприклад, двухлінзові, триплети, світлосильні об'єктиви, ширококутові, телеоб'єктиви тощо.

У зв'язку з високими вимогами до якості зображення всі лінзові об'єктиви, що використовуються в сканерах, є багатокомпонентними.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Перевагою лінзових систем є можливість гарної абераційної корекції, великі поля зору, технологічна простота конструкції, можливість суміщення функції захисного скла й першого компонента, невелике він'єтування по полю зору.

Найменшу відстань від першого компонента до заднього фокуса забезпечують телеоб'єктиви. Вони містять перший позитивний компонент і другий негативний компонент, який розташований на певній відстані від першого. Кожен з компонентів складається з декількох лінз. У телеоб'єктиві задня головна площина винесена на деяку відстань уперед від першого компонента, в результаті чого відстань від першого компонента до заднього фокуса в 1,3 ... 1,8 рази коротше за його фокусну відстань.

Лінзовим об'єктивам притаманні такі недоліки, як велике селективне поглинання в ряді ділянок оптичного спектра, порівняно великі хроматичні аберації, великі поздовжні габарити.

Ці недоліки відсутні в дзеркальних системах, основним достоїнством яких є можливість роботи в широкому спектральному діапазоні з малими втратами потоку, відсутність хроматизму, невеликі поздовжні габарити, що приводить до зменшення маси БК ОЕСС. Основними недоліками дзеркальних систем є екранування частини випромінювання, яке проходить на об'єктив, що знижує функцію передачі модуляції (ФПМ), необхідність використання дзеркальних асферичних поверхонь, труднощі боротьби із прямими засвічуваннями, незначні поля зору й велике він'єтування по полю зору. У дзеркальних об'єктивах поліпшення абераційних якостей обмежується малою кількістю корекційних параметрів.

Деякі із цих недоліків відсутні в дзеркально-лінзових системах, у яких можна досягти більших відносних отворів і значних кутів поля зору.

Дзеркально-лінзові схеми мають більшу, у порівнянні із дзеркальними системами, кількість корекційних параметрів, серед яких найбільше значення мають показники заломлення прозорого матеріалу лінз. Застосування менісків і дзеркал Манжена (дзеркала із внутрішнім

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

відбиттям) дозволяє створювати об'єктиви без використання асферичних поверхонь, виготовлення й контроль яких викликає значні труднощі.

Існують й інші типи об'єктивів. Розроблювач ОЕСС, виходячи з технічних вимог і орієнтовного габаритного розрахунку, для подальших розрахунків вибирає один або декілька близьких до передбачуваного типів.

При виборі об'єктивів варто виходити з того, що:

- якщо до ОЕСС пред'явлені високі вимоги до роздільної здатності на місцевості і ОЕСС складається з окремих каналів, що мають працювати у вузькому спектральному діапазоні, за основу до подальших розрахунків варто брати лінзовий об'єктив;
- якщо крім високих вимог до роздільної здатності, висуваються вимоги до забезпечення невеликих габаритів і маси, то за основу для подальших розрахунків варто брати лінзовий об'єктив невеликої довжини або дзеркально-лінзовий об'єктив з використанням асферики;
- якщо ОЕСС повинна працювати в широкому спектральному діапазоні або в ІЧ області в діапазоні 2,2 мкм ... 14 мкм, то за основу до подальшого розрахунку варто брати дзеркальний об'єктив;
- якщо до ОЕСС пред'являються середні вимоги до роздільної здатності і високі вимоги до маси й габаритів, то за основу до подальших розрахунків варто брати дзеркально-лінзовий об'єктив з використанням сферичних поверхонь із меніском або дзеркал Манжена;
- якщо необхідна довжина ОЕСС співрозмірна з фокусною відстанню об'єктива, то за основу до подальших розрахунків варто брати телеоб'єктив.

Якщо відомі параметри типового об'єктива, то при розрахунку об'єктива з новими параметрами часто користуються наступним прийомом: радіуси кривизни поверхонь оптичних елементів й їхньої товщини множать

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

на відношення фокусної відстані необхідного об'єктива до фокусної відстані відомого об'єктива. Отримані величини беруться за основу в подальших розрахунках й уточнюються в процесі їхнього проведення.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Завдяки значному прогресу в технічних рішеннях окремих каналів і зниженню їх вартості до складу сучасної БК ОЕСС входять, як правило, декілька різних каналів. Значну увагу в світі приділяють розробці БК ОЕСС з дуже великим числом спектральних діапазонів, у тому числі і в ультрафіолетовій області спектра, що дозволить точніше інтерпретувати спостережувані зображення.

Якщо в ранішніх розробках різні канали працювали по черзі для забезпечення цілодобового всепогодного функціонування БК ОЕСС, то в даний час у зв'язку з підвищенням вимог до ефективності їх функціонування помітно актуалізувалася задача узгодження інформації з різних каналів при їх одночасній роботі.

Процедура узгодження часто називається комплексуванням. Сучасні основи комплексування були сформульовані майже четверть століття назад [10]. З того часу запропоновано багато методів комплексування, що використовують різні моделі нейронних мереж, самонавчальних систем, теорію нечітких множин тощо. [11 – 13]. Всі ці роботи схожі в тому, що розглядається в основному математичний аспект проблеми - питання впливу технічних характеристик конкретних блоків БК ОЕСС на комплексування винесені за рамки розгляду. Не ставлячи під сумнів цінність запропонованих алгоритмічних рішень, доцільно з'ясувати ступінь впливу тих або інших складових на процес комплексування, що дасть можливість підвищити точність алгоритмів. Крім того, враховуючи, що споживачем інформації в переважній більшості БК ОЕСС є оператор, доцільним є розробка достатньо уніфікованих стратегій комплексування

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

для типових груп складових задач комплексування. На першому етапі слід встановити основні групи характеристик БК ОЕСС, які здійснюють істотний вплив на комплексування, а також з'ясувати можливу кількість узагальнених стратегій комплексування, що визначаються технічними характеристиками системи.

Комплексування здійснюється між джерелами інформації і центром ухвалення рішень (ЦУР). У разі реалізації всієї інформаційної системи у вигляді окремих фізичних пристроїв, при комплексуванні необхідно брати до уваги досліджуваний об'єкт, набір інформаційних датчиків і ЦУР (рис. 1.8) [14].

Алгоритми комплексування істотно залежать від того, чи знаходиться набір датчиків на одній або на декількох платформах. Для БК ОЕСС оптичного діапазону характерне розміщення датчиків на єдиній платформі а ЦУР може знаходитися як на цій же платформі, так і зовні неї. Другий варіант використовується в дистанційно керованих рухомих об'єктах і його розгляд виходить за рамки даної роботи. В першому варіанті набір датчиків і ЦУР функціонують в однакових зовнішніх умовах і виконують єдину задачу. Звичайно виділяють три основні стратегії комплексування, які визначаються тим, чи працює ЦУР з необробленими сигналами від датчиків (комплексування на рівні датчиків), або частина функцій ЦУР передається датчикам і на його вхід подається заздалегідь оброблена інформація (комплексування на рівні узагальнених параметрів) або в ЦУР з кожного каналу подається повністю оброблена інформація і остаточне рішення приймається виходячи з аналізу часткових рішень (комплексування на рівні рішень). У будь-якому випадку функціональні блоки ОВС з точки зору комплексування утворюють єдине середовище, що аналізує вхідне поле під впливом зовнішніх умов. Вхідним полем при цьому є фоно-цільова обстановка.



Рисунок 1.8 – Основні елементи задачі комплексування

Узагальнена структура середовища комплексування (рис. 1.9) визначається формою подання інформації датчиками в ЦУР і типом ЦУР. Перша ознака визначається вказаними вище стратегіями комплексування. За другою ознакою можна виділити середовища комплексування з автоматичним ЦУР, напіваавтоматичні і неавтоматизовані з людиною-оператором в ролі ЦУР. Останній випадок на сьогодні найбільш поширений і використовується для забезпечення згаданого вище всепогодного функціонування ОВС [15]. Такий режим роботи максимально завантажує оператора, практично виключає одночасне використання різних датчиків і є неперспективним. На найближчий час найперспективнішими будуть напіваавтоматичні середовища комплексування, а пізніше - автоматичні.

Середовище комплексування функціонує під впливом зовнішніх умов і вирішуваної задача. Очевидно, що правила функціонування середовища повинні задаватися ЦУР виходячи з його особливостей. Тоді пріоритетним чинником, що визначає алгоритми функціонування середовища, є поточна задача.

Задачі, які вирішують БК ОЕСС (пошук/виявлення об'єкту, розпізнавання об'єкту, наведення/супровід), задають релевантні ознаки вхідного поля і логіку роботи ЦУР, які практично не залежать від типу датчиків.

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

Зовнішні умови є дестабілізуючими чинниками і формують реакцію середовища, направлену на відновлення робочих режимів в прийнятних діапазонах. Слід розділити зовнішні умови по місцю їх впливу: умови функціонування датчиків і ЦУР. Відповідно, в першому випадку зовнішні умови впливають безпосередньо на сигнали датчиків, а в другому - через режим роботи ЦУР - на алгоритми комплексування. У будь-якому випадку конкретні параметри зовнішніх умов нескладно звести до поправочних коефіцієнтів, граничних умов тощо, які описують роботу датчиків і ЦУР.

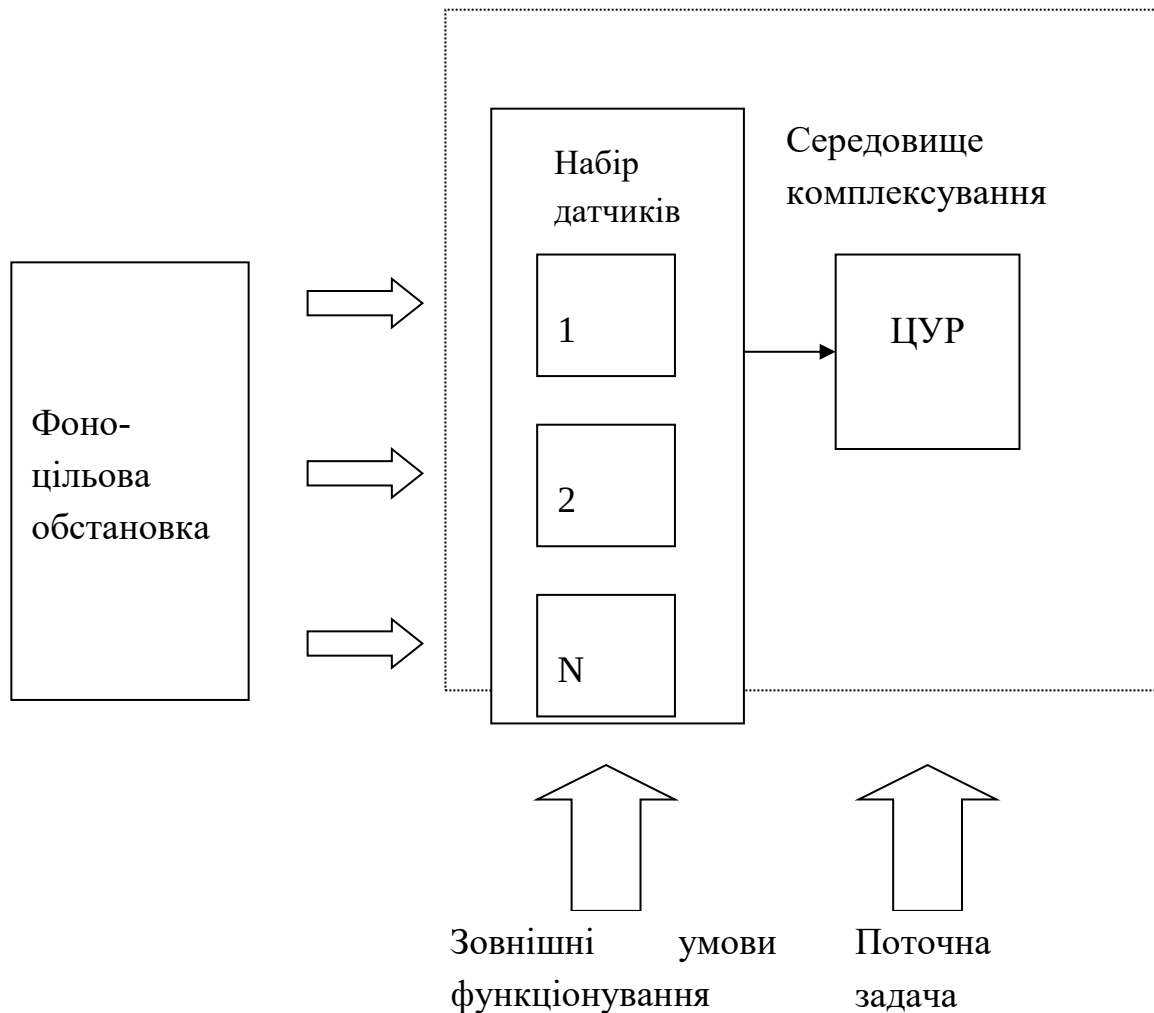


Рисунок 1.9 – Структурна схема середовища комплексування

Другим значущим чинником життєдіяльності середовища є фоно-цільова обстановка. Причому, в автоматичних середовищах, правила ухвалення рішень яких не визначаються жорстко особливостями

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

візуального сприйняття людини і можуть необмежено модифікуватися, фоно-цільова обстановка як формотворчий чинник має більше значення, ніж в напіваавтоматичних і неавтоматизованих середовищах. В контексті рішення задачі комплексування інформації фоно-цільова обстановка є просторово-часовим розподілом електромагнітного поля на входах датчиків, який сформований в результаті взаємодії фізичних об'єктів в полі зору із зовнішніми полями і середовищем розповсюдження випромінювання. Для переважної більшості реальних ситуацій можна виділити три типи фонів [16]: однорідні, квазіоднорідні, неоднорідні, які, в свою чергу розділяються на десятки класів і підкласів. Щодо визначення типових об'єктів спостереження – тут ситуація ускладнюється значною кількістю можливих галузей застосування БК ОЕСС. Вплив середовища розповсюдження випромінювання на фоно-цільову обстановку має загалом досить складний характер, але за нечисленними виключеннями його подібно до зовнішніх умов можна врахувати в параметрах об'єктів і фонів.

Чутники, не визначаючи в цілому ідеологію роботи середовища комплексування, впливають на неї через формати подання інформації. Для БК ОЕСС характерними видами інформації, що поступає з датчиків, є електричний сигнал або оптичний сигнал, формати подання інформації в яких визначаються конкретними типами датчиків (табл. 1.5).

Як видно з таблиці, в ОВС використовуються три формати: двовимірний оптичний, тривимірний оптичний, електричний. Специфікації форматів (часові, енергетичні, фазові або просторові) важливі при комплексуванні на рівні датчиків [17, 18] або узагальнених параметрів. У разі комплексування на рівні рішень конкретні характеристики форматів значення не мають.

Аналіз призначення, технічних і експлуатаційних характеристик ОВС керованих рухомих об'єктів показує, що кількість K_k стратегій комплексування інформації визначається виходячи з кількості задач комплексування $K_{зк}$, форматів даних датчиків $K_{фд}$, типів фоно-цільової обстановки $K_{фц}$ і з урахуванням рівня комплексування:

1.3 Комплексуювання в БК ОЕСС

$$K_k = \left[\begin{array}{l} K_{зк}, \text{ рівень рішень} \\ K_{фц} \cdot K_{фд} \cdot K_{зк}, \text{ рівень чутників} \end{array} \right].$$

В найпростішому випадку типового об'єкту на рівномірному фоні при комплексуюванні на рівні ухвалення рішень кількість стратегій дорівнює кількості задач; при комплексуюванні на рівні датчиків - може досягати дев'яти.

Таблиця 1.5 Типи датчиків сучасних БК ОЕСС

п/п	Тип чутника	Спектральний діапазон роботи, мкм	Формат вихідного сигналу
1.	Монокулярний візуальний канал	0,4 – 0,8	Двовимірний оптичний
2.	Бінокулярний візуальний канал	0,4 – 0,8	Дво/тривимірний оптичний
3.	Електронно-оптичний перетворювач	0,4 – 0,9	Двовимірний оптичний
4.	Телевізійна система	0,4 – 0,8	Електричний / двовимірний оптичний
5.	Низькорівнева телевізійна система	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
6.	Лазерна система бачення	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
7.	Тепловізійна система	3 – 5, 8 – 14	Електричний / двовимірний оптичний
8.	Відеоспектрометр	0,4 – 1,5	Електричний / двовимірний оптичний
9.	Відеополяриметр	0,4 – 0,9	Електричний / двовимірний оптичний
10.	Радіолокаційна система	більше 1000	Електричний / двовимірний оптичний

Крім того, потребує додаткового глибокого вивчення візуальна діяльність оператора БК ОЕСС. Механізми зорового пошуку на рівномірних фонах вивчені в достатній мірі для адекватного моделювання відповідних алгоритмів роботи системи, в тому числі – комплексуювання. У

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

випадку нерівномірних фонів існує необхідність формалізації опису фоно-цільової обстановки для класифікації її складності і внесення потрібних змін в алгоритми комплексування. Механізми розпізнавання вивчені недостатньо, але є кілька добре корельованих з ефективністю роботи БК ОЕСС характеристик і складних ознак зображень, які можна вважати релевантними на етапі розпізнавання. До перших відносяться контраст, просторове розділення, відношення "сигнал/шум", просторово-частотний склад шумів, динамічний діапазон; до других – форма об'єкта, ступінь схожості об'єкта і фонових утворень. Як і в випадку зорового пошуку, для ефективного комплексування сигналів при розпізнаванні потрібно формалізувати опис складних ознак зображень і привести їх до набору характеристик, які піддаються математичному моделюванню.

2 Методи і засоби вимірювання параметрів та характеристик БК ОЕСС

Приблизні вимоги до методик та засобів вимірювання характеристик БК ОЕСС виходячи з діапазонів вхідних величин такі:

- вимірювання інтегральної чутливості з похибкою не більше 6 % в кожному спектральному піддіапазоні. Енергетична яскравість тест-об'єкта в спектральному діапазоні $\Delta\lambda=0,4$ мкм ... 2,0 мкм має змінюватись в межах (100...250) Вт/м²ср з точністю не гірше 0,5 %;
- вимірювання відносної спектральної чутливості в видимому діапазоні з спектральною границею розділення $\delta\lambda=0,01$ мкм і похибкою не більше 5,5 %. Спектральна границя розділення тестового сигналу $\delta\lambda=0,01$ мкм має відтворюватись з точністю 0,5 %;
- вимірювання функції передачі сигналу з похибкою не більше 1 % в кожному спектральному піддіапазоні;

1.3 Комплексування в БК ОЕСС

- вимірювання зонної чутливості. Нерівномірність сигналу по полю у вхідній зіниці БК ОЕСС не більше 1%;
- вимірювання повздовжньої та поперечної модуляційної передаточної функції з похибкою не більше 10% в кожному спектральному піддіапазоні.

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

Створення БК ОЕСС дистанційного спостереження обумовила розробку цілого комплексу технічних засобів [19], в тому числі - БК ОЕСС високого розділення, що являє собою оптико-електронну систему, яка реалізує метод багатоспектральних радіометричних вимірювань [20]. Нижче наведена таблиця 2.1, яка містить опис декількох видів БК ОЕСС, що застосовуються у дистанційному зондуванні Землі з космосу. Дана таблиця побудована на основі попереднього розділу і є своєрідним збірником використовуваних БК ОЕСС для дослідження природних ресурсів.

Основні технічні параметри БК ОЕСС, призначених для отримання багатоспектральних просторово-суміщених зображень земної поверхні в декількох спектральних зонах, такі:

- кут огляду, кут. град.;
- ширина смуги огляду, км;
- просторове розділення, м;
- робочий спектральний діапазон, мкм;
- кількість спектральних зон;
- частота сканування, Гц;
- діаметр вхідного об'єктива, мм;
- площа вхідної зіниці, см²;

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

- положення вхідної зіниці відносно посадкової площини у бік зображення, мм
- фокусна відстань оптичних систем для певних спектральних зон, мм;
- коефіцієнт пропускання оптики;
- кількість пікселів у фотоприймачі;
- розмір пікселя, мкм $\times$ мкм;
- крок пікселів, мкм;
- габаритні розміри, мм;
- маса, кг
- енергоспоживання, Вт;
- кількість інформативних каналів;
- інформативність, Мбіт/с.

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

Таблиця 2.1 Оптичні схеми БК ОЕСС та їх характеристики

Назва супутника	№ рисунка БК ОЕСС	Характеристика БК ОЕСС								
		Смуга огляду, км.	Кут сканування, град.	Просторове розділення, м	Спектральний діапазон, мкм	Кількість спектральних каналів	Діаметр вхідної зіниці об'єктива, мм	Фокусна відстань, мм	Кількість елементів у фотоприймачі	Маса, кг
"Метеор-природа"	БК ОЕСС-СК Рис. 1. 1	600	66,5	170	0,5 – 1	4	200			47
	БК ОЕСС-Е Рис. 1. 2	30	2,5	30	0,5 – 1	3			1024	17
	"Фрагмент"	85		80	0,4 – 2,4	8	240	1000		
	БК ОЕСС-М Рис. 1. 3	1930	106	1700 × 1000	0,5 – 1	4	18,75	75	1	4,5
	БК ОЕСС-С Рис. 1. 3	1380	90	142 × 240			18,75	75	1	5,5
Landsat	MSS Рис. 1. 5	185		80	0,5 – 12,6	5		820		100

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

Таблиця 2.1 Продовження

Назва супутника	№ рисунка БК ОЕСС	Характеристика БК ОЕСС								
		Смуга огляду, км.	Кут сканування, град.	Просторове розділення, м	Спектральний діапазон, мкм	Кількість спектральних каналів	Діаметр вхідної зіниці об'єктива, мм	Фокусна відстань, мм	Кількість елементів у фотоприймачі	Маса, кг
SPOT	"Кольорові" канали			20	0,5 – 0,89	3				
	Чорно-білий канал	60	±29, 23	10	0,51 – 0,73	1			6000	
Ресурс – 0.1	БК ОЕСС-СК	600		170	0,5 – 12,6	5				
	БК ОЕСС-Е Рис. 1. 4	48		24×37	0,5 – 0,90	3	1/4,7	349,2	2048	27
	„Доломит”	80		4	0,5 – 0,8	4	1/7	1800	23424	450
Океан – О	БК ОЕСС-В	195		50, 100 та 250	0,48 – 12,0		260		10, 5 та 2	290
	БК ОЕССВ Рис. 1. 6	200	16,68		0,45 – 12,5	8	260			290
Landsat-3	RBV (телевізійні камери)	93		40	0,505 – 0,75					
Landsat-D	MSS	185		30 та 120	0,48 – 12,6	7				

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

В таблиці 2.2 наведені усереднені діапазони значень характеристик деяких типів БК ОЕСС.

Таблиця 2.2 Діапазони значень характеристик БК ОЕСС

Параметр	Діапазон значень
Спектральний діапазон, мкм: - видимі та ближні інфрачервоні канали - інфрачервоні канали	0,4 – 2,45 10,4 – 14,54
Кількість інформативних каналів	5 – 192
Ширина смуги огляду, км	24 – 2700
Просторове розділення, м	4 – 188
Кількість пікселів у фотоприймачі	2048 – 6000×10400
Фокусна відстань оптичних систем для певних спектральних зон, мм	349,2 – 1800
Маса, кг	27 – 450
Діаметр вхідного об'єктива, мм	87,5 – 411,5

До енергетичних характеристик БК ОЕСС відносять наступні:

- функцію передачі сигналу (ФПС) – залежність електричного сигналу на виході БК ОЕСС від яскравості, що поступає на вхід, $U(L)$;
- спектральну характеристику – залежність електричного сигналу на виході БК ОЕСС від довжини хвилі зондуючого випромінювання, $U(\lambda)$;
- відносну зонну характеристику – нерівномірність чутливості елементів багатоелементного приймача (ПЗЗ лінійки).

Саме зазначені характеристики (перші дві у відносних одиницях) вимірюються на стадії передпольотної метрологічної атестації каналів БК ОЕСС, що встановлюються на борту космічних апаратів дистанційного зондування Землі. Потім після переносу одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ) від еталону до метрологічних випромінюючих елементів атестаційної установки виконується абсолютизація їх шкал відносної яскравості та визначаються основні

2.1 Енергетичні характеристики БК ОЕСС

параметри БК ОЕСС по виміряним раніше відносним характеристикам: інтегральна, зонна та абсолютна спектральна чутливість, динамічний діапазон [21]. Абсолютизація шкали яскравості і спектральної характеристики здійснюється за допомогою дифузного освітлювача, виконаного, як правило, у вигляді фотометричної кулі, по периферії якої розташовані освітлювачі (бажано з широкими індикатрисами) [22]. Дифузний освітлювач має бути атестований за СЩЕЯ у відповідності до [23].

2.1.1 Вимірювання функції передавання сигналу

Вивчення світлочутливих властивостей фотоелектричних приймачів випромінювання (ПВ) і параметрів світловимірювальних пристроїв вимагає застосування фотометричного приладу, який тим чи іншим способом створює нормований ряд освітленості або яскравості, чи дозволяє плавно змінювати (що є пріоритетним) ці величини на поверхні світлоприймача або вхідного вікна світловимірювального приладу. Для вимірювання параметрів фотоелектричних ПВ застосовують засоби вимірювання, які пройшли державні випробування у відповідності до ДСТУ 3400:2006 «Метрологія. Державні випробування засобів вимірювальної техніки. Основні положення, організація, порядок проведення і розгляду результатів». Нестандартизовані засоби вимірювань повинні бути атестовані за ДСТУ 3215-95 «Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення». Схема вимірювань повинна задовольняти вимогам ДСТУ 7392:2013 та ДСТУ-Н ПМГ 44:2013. Інші вимоги до засобів вимірювання характеристик ПВ наведені в [24].

Для виконання поставленого завдання (створення каліброваного ослаблювача або інтегрального освітлювача з каліброваною яскравістю, що міг би бути основою фотометричного вузла первинного приладу) необхідно:

2.1.1 Вимірювання функції передавання сигналу

- висунути вимоги до методів вимірювання ФПС;
- вибрати і обґрунтувати принцип побудови ослаблювача;
- обґрунтовано підібрати конструктивні елементи (первинні ДВ, розсіювальні пластинки та покриття тощо) за їхніми характеристиками і властивостями для найкращої реалізації відповідної експериментальної установки.

Еквівалентна вимірювальна схема функції передавання сигналу БК ОЕСС має вигляд, наведений на рис. 2.1.

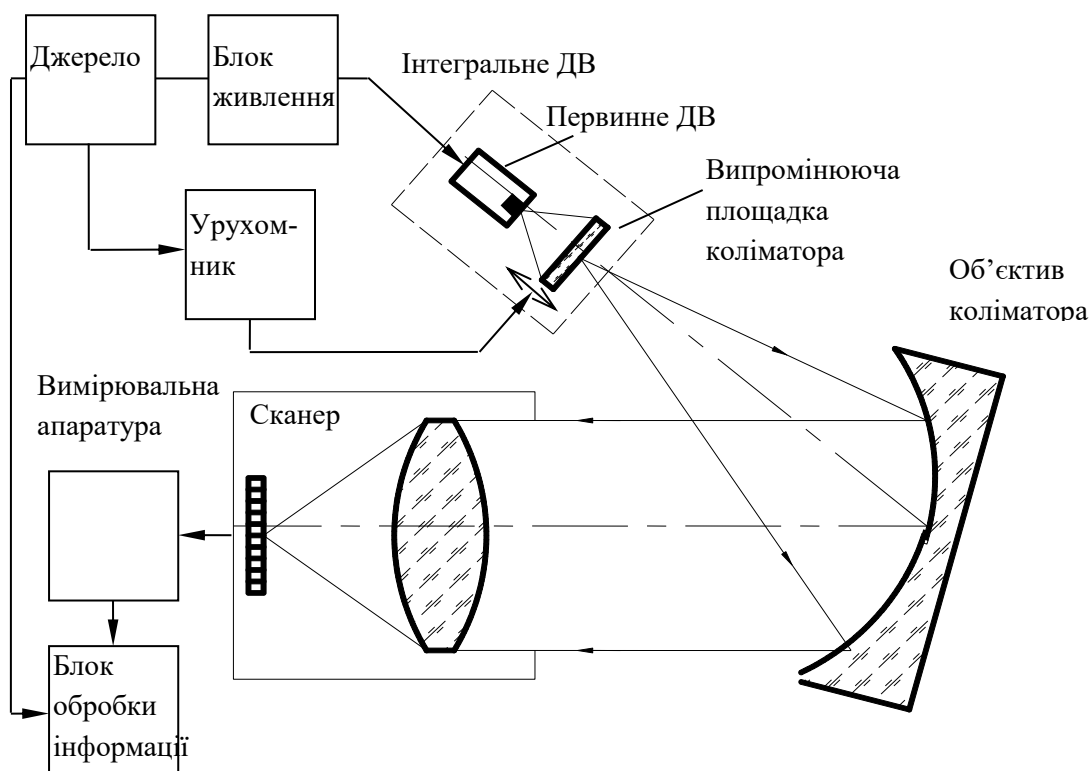


Рисунок 2.1 - Функціональна схема вимірювання функції передачі сигналу БК ОЕСС

З метою обґрунтованого вибору ослаблювача світла на основі існуючих методів ослаблення необхідно сформулювати вимоги, яким цей ослаблювач повинен задовольняти. Логічно вважати, що зразковий ослаблювач світла, який служить еталоном оптичної щільності для вимірювання ФПС багатоелементних ПВ, повинен забезпечувати можливість градуювання на основі точного дотримання одного з

2.1.1 Вимірювання функції передавання сигналу

фотометричних законів і мати наступні властивості:

1) спектральну нейтральність у всьому діапазоні ослаблення світла (у видимому та ближньому ІЧ діапазонах спектра – 0,4 мкм ... 1,8 мкм);

2) незмінність апертури пучка світла, що ослаблюється, тобто сталістю геометрії поля зору приймача світла, оскільки зміна апертури може викликати помилку, обумовлену розходженням чутливості ПВ до світлових променів, що йдуть із різних напрямків;

3) відсутність дифракційних втрат або їх мінімізація;

4) рівномірність ослаблення пучка світла по його перетину;

5) максимальна яскравість вторинного джерела (випромінюючої площадки коліматора) $L_{\text{вих}}^{\text{max}} = 1500 \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$. Ця вимога впливає з

експериментальних даних про виміряні освітленості поверхні Землі для певних спектральних зон сканера;

6) динамічний діапазон яскравості вторинного джерела $\frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{min}}} = 10^5$;

7) мінімальні габарити установки;

8) по можливості більше поле з рівномірною яскравістю (для освітлення одночасно всього БПВ);

9) нерівномірність яскравості вторинного випромінювача $\Delta L \leq 2\%$;

10) найбільша можлива точність установлення необхідного коефіцієнта ослаблення (залежить від точності виконання використовуваного фотометричного закону);

11) оптимальна кількість градації яскравості (для дискретної зміни яскравості);

12) мінімальна похибка установлення потрібного значення яскравості.

2.1.1.1 Критерії оцінки методів вимірювання ФПС

Високі вимоги по точності вимірювання характеристик земної поверхні БК ОЕСС потребують здійснення прецизійного градуювання системи за допомогою метрологічної установки. Тому, як найважливіший критерій для оцінки можливості застосування того чи іншого методу ослаблення оптичного випромінювання в інтегральному освітлювачі атестаційної метрологічної установки, можна використати точність витримування залежності яскравості вторинного випромінювача від регульованого параметру, тобто градуювальну характеристику. Суттєву перевагу мають методи, що забезпечують лінійну градуювальну характеристику каліброваного ослаблювача випромінювання. Оскільки, це у багатьох випадках спрощує практичну реалізацію способу. Однак обмежитися для вибору методу ослаблення випромінювання в атестаційній установці лише цим критерієм було б некоректно.

Можливість обґрунтованого вибору оптимального методу ослаблення випромінювання при вимірюванні ФПС БПВ ускладнюється тим, що не існує універсального критерію оцінки метрологічного потенціалу методу. Найбільш адекватно оцінити спосіб калібрування яскравості інтегрального випромінювача можна за кількома параметрами, такими як:

- максимальна досяжна яскравість випромінюючої площадки коліматора;
- рівномірний розподіл яскравості по перетину вихідної зіниці освітлювача (у сагітальній та меридіональній площинах);
- розмір зони (лінійної) вихідної зіниці ослаблювача, у якій нелінійність розподілу яскравості не перевищує 1-2%, $K_n \leq (1...2)\%$;
- динамічний діапазон зміни яскравості $\frac{L_{\max}}{L_{\min}} \rightarrow 10^5$;
- енергетичний фактор K_e – добуток вихідної яскравості освітлювача на площу лінійної зони (даний параметр може бути використаний для

2.1.1.1 Критерії оцінки методів вимірювання ФПС

кількісної оцінки методу);

- габарити випромінювача (можна умовно оцінити за об'ємом, що займає випромінювач V_B , м³);
- габаритно-енергетичний фактор $\frac{K_e}{V_B}$ (також для кількісної оцінки).

Очевидно, що найперспективніший метод каліброваної зміни яскравості інтегрального освітлювача для вимірювання ФПС БК ОЕСС повинен по зазначеним критеріям мати найбільш близькі показники до зазначених раніше вимог (максимальну яскравість, зазначений динамічний діапазон яскравості тощо. Обрання принципу ослаблення за вказаними показниками потребує ретельного огляду й аналізу існуючих методів калібрування інтегральних випромінювачів, а також проведення додаткових розрахунків.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Вимірювання ФПС фотоелектричних приймачів, як уже відзначалося, вимагає застосування фотометричного приладу, який тим чи іншим способом створює нормований ряд освітленості або яскравості, чи дозволяє плавно змінювати ці величини на поверхні світлоприймача. Таким приладом є калібрований ослаблювач світла або калібрований інтегральний освітлювач. Ослаблювачем (по-латинському атенюатором) називається оптичний пристрій, призначений для зменшення (ослаблення) у необхідну кількість разів світлового потоку (енергії, освітленості, яскравості). Будь-який ослаблювач повинен мати вхід і вихід. Входом і виходом є, як правило, реальні діафрагми, що обмежують потік.

Основним параметром, по якому атестується ослаблювач із великою величиною ослаблення, варто вважати коефіцієнт ослаблення k . Ні в Міжнародному світлотехнічному словнику (Международный светотехнический словарь (International lighting vocabulary), ні в

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

ДСТУ 2755-94 «Фізична оптика. Терміни, визначення та літерні позначення основних величин» такого терміна немає, але поняттям «ослаблення світла в певну кількість разів» користувалися П. Бугер, А. А. Гершун, С. І. Вавілов, П. М. Тиходеєв. Безпосередньо термін «коефіцієнт ослаблення» використовується в ряді робіт, але визначається він по-різному. При дослідженні та розрахунку інтегральних випромінювачів з каліброваною яскравістю під коефіцієнтом ослаблення можна розуміти відношення максимальної можливої яскравості випромінюючої площадки коліматора до яскравості, що встановлюється на площадці при застосуванні того чи іншого фотометричного приладу $k = \frac{L_{\max}}{L}$.

У даному випадку при оцінці потенційних можливостей каліброваного інтегрального випромінювача доцільніше та зручніше використовувати добре відоме всім поняття інтегрального коефіцієнта пропускання. Але і воно не є досить універсальним, оскільки для еталонного інтегрального джерела випромінювання з каліброваною яскравістю найважливішими параметрами являються точність виконання використовуваного фотометричного закону (точність встановлення потрібного рівня освітленості випромінюючої площадки коліматора) та розподіл яскравості по перетину вихідної зіниці освітлювача, а також інші критерії, зазначені вище. Очевидно, що при розробці та практичній реалізації каліброваного випромінювача важливі й інші показники, такі як простота виготовлення та експлуатації, собівартість та ін.

На теперішній час асортимент ослаблювачів та їхнє використання настільки значний, що з'явилася необхідність у їхній класифікації. По характеру зміни величини, коефіцієнта ослаблення інтегральні випромінювачі підрозділяються на дискретні, плавні, постійні. За спектральними властивостями розрізняють ослаблювачі селективні й неселективні. По зміні характеристик випромінювання при ослабленні відрізняють освітлювачі, що не змінюють структуру пучка випромінювання (напрямок, поляризацію, розбіжність, когерентність тощо), від

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

ослаблювачів, що міняють цю структуру. По точності встановленого значення коефіцієнта ослаблення розділяють освітлювачі на прецизійні (еталонні, зразкові), вимірювальні (робочі) і грубі. Зразкові калібровані освітлювачі – найбільш точні прилади, що підлягають зберіганню в метрологічних лабораторіях і призначені для перевірки найпоширеніших освітлювачів – вимірювальних. Грубі ослаблювачі мають обмежене застосування, їх використовують для грубого регулювання рівня сигналу, а також для узгодження оптичного випромінювання із чутливістю даного приймача.

Підрозділяються калібровані випромінювачі й за принципами (способами, методами) ослаблення. Під принципами ослаблення мається на увазі не розходження у варіантах схем, а оптичні закони, застосовувані в пристроях освітлювачів з калібною яскравістю. Очевидно, що правильність вибору принципу ослаблення й знання його властивостей визначають простоту майбутньої конструкції, точність пристрою, його надійність і застосовність для того або іншого завдання.

В основу класифікації принципів ослаблення енергії оптичного випромінювання пропонується покласти фізичні закони, що дозволяють розраховувати енергію W_0 , випромінювану площиною S_1 на поглинаючу площину S_2 .

Обмежимося розглядом випадків, коли випромінюють і поглинають поверхні, хоча з фізичної точки зору поглинати енергію можуть тільки об'єми або елементарні об'єми.

Можливі декілька принципово різних підходів до побудови каліброваного освітлювача [25]:

- 1) Одним з найбільш перспективних можна вважати метод, оснований на переміщенні джерела випромінювання (ДВ) відносно розсіювальної площини, яка розміщена у фокальній площині об'єктива градуовального коліматора. Така площинка може працювати як у світлі, що проходить, так і у світлі, що відбивається.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Коефіцієнт ослаблення (тобто зміна яскравості) визначається за законом зворотних квадратів по відомій формулі: $k = \frac{l^2}{l_0^2}$, де l_0 – початкова відстань від ДВ до площадки, що розсіює, l – відстань між ДВ і площадкою, що розсіює, при віддаленні ДВ.

- 2) Потужність потоку можна зменшити, зменшивши розміри площ S_1 та S_2 відповідно до S_1' й S_2' . Коефіцієнт ослаблення в загальному вигляді можна визначити в такий спосіб (закон адитивності потоків):

$$k = \frac{S_1 \cdot S_2}{S_1' \cdot S_2'}. \text{ Відомий метод вирахування потоків випромінювання є}$$

наслідком різного підсумовування елементарних потоків по площах S_1 та S_2 , які можуть змінюватися.

- 3) Збільшення кутів ϕ_1 і ϕ_2 між віссю променя елементарного світлового потоку й нормаллями відповідно до елементів dS_1 й dS_2 до ϕ_1' і ϕ_2' призводить до зменшення освітленості. Коефіцієнт ослаблення визначається за законом косинусів: $k = \frac{\cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2}{\cos \phi_1' \cdot \cos \phi_2'}$.

- 4) Яскравість потоку можна зменшити шляхом часткового поглинання випромінювання, що поширюється. Коефіцієнт ослаблення визначається за законом Бугера з виразу: $k = \frac{\tau_0}{\tau}$, де τ_0 – пропускання середовища до введення поглинаючого середовища; τ – пропускання середовища після введення поглинаючого середовища, причому $\tau \leq \tau_0$.

- 5) Яскравість потоку можна також зменшити, скориставшись відбиттям частини потоку на межі розподілу середовищ із різними показниками заломлення. Коефіцієнт ослаблення для відбитого випромінювання при нормальному падінні визначається за законом Френеля: $k = \frac{n_0}{n}$, де n_0 і n – повні коефіцієнти відбивання до й після використання

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

пристрою, що послабляє, причому $n \leq n_0$.

- 6) Яскравість потоку можна зменшити шляхом поляризаційного гасіння.

Коефіцієнт ослаблення визначається за законом Малюса: $k = \frac{\tau_0}{\tau'}$, де τ_0, τ' – коефіцієнти пропускання поляризаційної системи до і після одержання необхідного коефіцієнта ослаблення, причому $\tau' \leq \tau_0$.

- 7) Ведення в пучок променів оптичного елемента, що має оптичну силу або володіє властивостями розсіювача, приводить до того, що відбувається збільшення тілесного кута, у якому розповсюджується потік. Звідси, відповідно до принципу вторинного джерела, потужність потоку Φ_0 , що проходить через деяку діафрагму dS_0 , зменшується через розширення тілесного кута $d\Omega_0$ (в якому поширюється потік, що ослаблюється) до $d\Omega$. Коефіцієнт ослаблення можна визначити у вигляді залежності: $k = \frac{d\Omega}{d\Omega_0}$, причому $d\Omega \geq d\Omega_0$.

- 8) Випромінювання можна послабити й за допомогою його фільтрації в певному спектральному інтервалі (принцип спектрального виділення). У цьому випадку коефіцієнт ослаблення: $k = \frac{\Phi_0}{\Phi_{\lambda_1-\lambda_2}}$, де

$\Phi_{\lambda_1-\lambda_2}$ – потік, який випромінює ДВ у спектральній зоні від λ_1 до λ_2 .

- 9) При коротких імпульсах випромінювання приймачі стають досить інерційними і реагують не на потужність потоку Φ_0 , а на енергію потоку $W_0 = \Phi_0 \cdot t$, де t – час дії світлового імпульсу. Цю обставину враховують при світлових вимірах за допомогою ока, фотопластинок і термоелементів. Тому існує часовий принцип ослаблення, при якому $k = \frac{t_0}{t}$, де t – тривалість імпульсу після ослаблення, причому $t < t_0$.

Правильне використання тимчасового принципу вимагає виконання закону Тальбота.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

- 10) Яскравість потоку можна зменшити шляхом часткового розсіювання випромінювання, що поширюється. Розсіювання потоку може відбуватися на оптичних поверхнях, у оптичних середовищах та на внутрішній поверхні сфери. В залежності від типу розсіювання коефіцієнт ослаблення буде визначатися різними формулами. У випадку, коли розсіювання відбувається у оптичному середовищі, ослаблення випромінювання подібне до ослаблення на основі закону Бугера. Якщо випромінювання ослаблюється при розсіюванні на оптичній поверхні, то відбувається збільшення тілесного кута, у якому розповсюджується потік. Третій випадок також має альтернативи.
- 11) Ослаблювач, який використовує розсіювання випромінювання на внутрішній поверхні сфери, може бути побудований на комбінації таких принципів ослаблення:
- розсіювання на внутрішній поверхні однієї сфери та закону обернених квадратів;
 - розсіювання на внутрішніх поверхнях двох сфер та закону адитивності потоків.

Комбінування перерахованих вище принципів ослаблення дозволяє оптимізувати побудову оптичного пристрою, наприклад ослаблювача на основі селективного френелівського відбиття. Розглянуті вище фотометричні принципи зменшення енергетичних і світлових величин оптичного випромінювання є основними. Слід зазначити, що значне ослаблення енергії випромінювання, що поширюється в певному напрямку, приводить до якісної зміни властивостей випромінювання: спочатку більшою мірою проявляються хвильові, а потім, уже при реєстрації одиничних фотонів, – квантові властивості випромінювання.

На основі наведеного матеріалу можна відмітити, що для забезпечення поставлених до каліброваного інтегрального освітлювача

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

вимог, доцільно проаналізувати конкретні схеми реалізації випромінювачів з ослабленням світла, побудованих на певних принципах ослаблення, та виявити їх недоліки та переваги.

Однією з найбільш розповсюджених і застосовуваних є схема з безпосереднім освітленням пластинки, що дифузно розсіює, за законом зворотних квадратів відстаней. Зокрема цей спосіб застосовується у денситометрії та мікроденситометрії для дослідження властивостей фотографічних матеріалів та кількісної оцінки фотографічного зображення. Теоретичні й експериментальні дослідження показали, що ослаблювач, в основі якого лежить закон зворотних квадратів відстані, може працювати з високою точністю, при цьому його діапазон коефіцієнта пропускання лежить у межах $\tau = (6...90)\%$. Обмеження діапазону ослаблення світлового потоку в такій установці обумовлено збільшенням її габаритів. Це викликає ряд незручностей, пов'язаних з розмірами приміщення, у якому проводяться виміри, і із труднощами усунення сторонніх засвічувань, завадами технологічного характеру.

Пропонується спосіб розширення діапазону вимірів оптичної щільності денситометрів, який працює за допомогою оптичної лави, без збільшення габаритів установки. Спосіб заснований на застосуванні опуклих дзеркал. Геометричне розширення пучка променів за допомогою опуклих дзеркал приводить до ослаблення світлового потоку, аналогічному тому, яке досягається збільшенням відстані між джерелом і приймачем світла. Зворотно-поступальне переміщення приймача випромінювання уздовж шкали відповідає за законом зворотних квадратів відстані значенню коефіцієнта пропускання:

$$\tau_1 = \frac{l_1^2}{l_2^2},$$

де l_1 і l_2 – початковий та наступний відлік відстаней по шкалі між точковим джерелом і приймачем світла.

Заміна плоских дзеркал 5 опуклими 5' додатково послабляє світловий

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

потік за рахунок збільшення розбіжності пучка променів від кута Ω_1 до кута Ω_2 і загальний коефіцієнт пропускання стає рівним $\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 = \frac{l_1^2}{l_2^2} \cdot \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$.

Розрахунок показав [26], що при введенні сферичних дзеркал й одночасному збільшенні діафрагми можна розширити границі вимірів оптичної щільності до $D=2,041...5,301$ ($\frac{1}{\tau} = 1,1 \times 10^2 ... 2 \times 10^5$) при найменшій

точності $\Delta D = 0,018$ ($\frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{\tau}{\tau} = 4\%$). Якщо використати плавне ослаблення

світла, здійснюване зміною кута відбиття від плоскої скляної пластинки, то відповідно до закону Френеля можна одержати додатковий діапазон значень оптичної щільності $D=6,681 ... 8,544$ ($\frac{1}{\tau} = 4,8 \times 10^6 ... 3,5 \times 10^8$)

при найменшій точності $\Delta D = 0,022$ ($\frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{\tau}{\tau} = 5\%$). Відмітимо, що даних про

практичну реалізацію такого пристрою поки немає. Хоча наведений випромінювач має абсолютну спектральну нейтральність, йому властиві зсув променя на приймачі світла, мінливість апертури й оптичної довжини ходу променів, а точність виміру великої оптичної щільності (малої яскравості) не відповідає вимозі до зразкового інтегрального освітлювача.

У роботі [27] наведені оптичні системи стендів з френелівськими ослаблювачами для відтворення значень різниць енергетичної яскравості та радіаційних температур ($\Delta L_e \leq (1 \pm 0,2) \frac{mBm}{cp \cdot m^2}$ та $\Delta T_p \leq (0,5 \pm 0,1) mK$), необхідних для прямих вимірювань мінімально роздільних рівнів зазначених величин скануючими оптико-електронними приладами. Отримання указаних рівнів різниць енергетичної яскравості та радіаційних температур вимагає використання суто оптичних додаткових способів ослаблення випромінювання. Представляється доцільним вибирати оптичні матеріали для додаткових ослаблювачів і визначати їхні

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

коефіцієнти пропускання на основі перевірених на досвіді теоретичних положень, до числа яких можуть бути віднесені формули Френеля, що кількісно описують закони відбиття й пропускання оптичного випромінювання на гладкій границі розподілу двох середовищ, що характеризуються їхніми показниками заломлення n і поглинання k . Як оптичні матеріали для ослаблювачів найбільш кращими виявляються прозорі в робочій області спектра діелектрики й напівпровідники, для яких значення n вірогідно визначені й стандартизовані [28], а значення k настільки малі ($k \ll (n - 1)$), що практично не роблять впливу на коефіцієнти відбиття границі середовищ.

Одна з можливих оптичних схем для створення калібрувально-випробувальних стендів із дзеркально відбиваючими мірами із дискретними оптичними ослаблювачами наведена на рис. 2.2. Випромінювання від МЧТ-1 1 (моделі чорного тіла) і МЧТ-2 3 падає на дзеркальні грані міри 2, установлені у фокусі коліматора 4-5. У паралельному потоці випромінювання розташована система, що послаблює, яка складається із двох плоских дзеркально відбиваючих поверхонь 6 й 7, які встановлені таким чином, що горизонтально вихідний з коліматора потік випромінювання падає на площину 6 під кутом 45° до її поверхні й відбивається від її у вертикальному напрямку по осі 6-7. Потім цей потік падає на площину 7 також під кутом 45° і відбивається нею в горизонтальному напрямку по осі 7-8, перпендикулярної в проекції оптичної осі 4-6 (на рисунку вісь 7-8 й елементи 7-11 умовно повернені на 90° навколо осі 6-7). Далі зображення міри формується в «нескінченності» змінним телескопічним об'єктивом 8-9, вихідна діафрагма 10 якого повинна бути узгоджена по діаметру із вхідною апертурою приладу 11.

Наведений в [29] розрахунок пропускання τ оптичного освітлювача із двох пластин, кожна з яких відбиває тільки однією зовнішньою поверхнею, показав, що неполяризований потік випромінювання, який надходить на її вхід, виявляється на виході знову неполяризованим і сильно ослабленим (внутрішні поверхні відбивачів повинні бути нахилені стосовно робочих

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

зовнішніх поверхонь на такий кут, щоб створювані через них зображення міри 2 виявлялися поза полем зору каліброваного приладу). Коефіцієнт пропускання такого ослаблювача дорівнює $\tau = \rho_p \cdot \rho_s$ де ρ_p і ρ_s – коефіцієнти відбиття складових загального потоку, поляризованих, відповідно, у площині падіння й перпендикулярній їй площини. З огляду на те, що відповідно до формул Френеля поза залежністю від значень n и k для кутів падіння 45° справедлива рівність $\rho_s = \rho_p^2$ (отже, $\tau = \rho_p^3$).

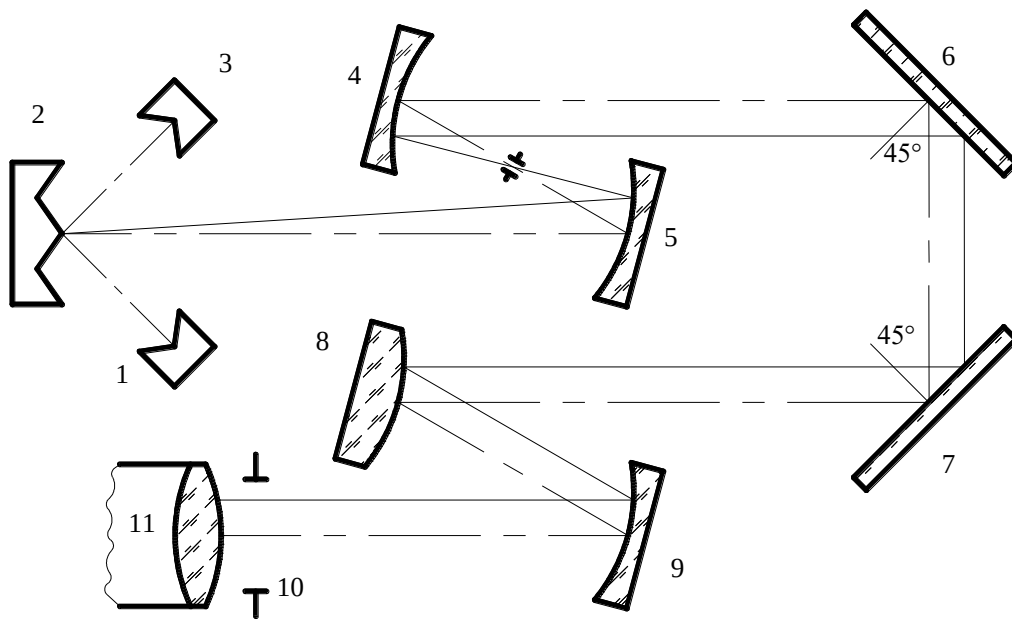


Рисунок 2.2 - Оптична система з дискретними ослаблювачами на законі Френеля

Для області спектра (8 – 12) мкм при використанні фтористого барію ($n \approx 1,4$) одержуємо $\rho_p = 0,0685$ й $\tau = 3,21 \cdot 10^{-4}$, а для оптичної кераміки ПО-4 ($n \approx 2,4$) маємо $\rho_p = 0,28$ й $\tau = 2,18 \cdot 10^{-2}$.

Інший принцип відтворення й нормування рівнів різниць енергетичної яскравості та радіаційних температур, також заснований на використанні формул Френеля, складається в безпосереднім одержанні на гранях дзеркальної штрихової міри відомих значень різниць енергетичної яскравості та радіаційних температур, створюваних одним випромінювачем у результаті проекції його зображень двухканальною

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

освітлювальною системою на грані міри. Різниця коефіцієнтів пропускання каналів освітлювальної системи встановлюється й регулюється зміною в одному з них кута падіння паралельного пучка випромінювання на прозору плоскопаралельну пластину. Плавна зміна кута падіння однозначно, відповідно до формул Френеля, визначає плавну зміну коефіцієнта пропускання пластини, що у свою чергу змінює енергетичну яскравість зображення випромінювача в одній частині полів міри при незмінній її величині в іншій частині. У пристроях, що реалізують другий принцип, одночасно з основними зображеннями випромінювача, створюваними на мірі двома каналами освітлювача, створюються додаткові (нехай і розмиті) зображення тих ділянок усередині пристрою, випромінювання яких після відбиття від розташованих у цих каналах пластин, попадає на міру й при наявності температурної неоднорідності ділянок спотворює поля яскравості дзеркальної міри. Такі спотворення, різні при різних кутових положеннях пластин, виявляються тим більше інтенсивними, чим вище коефіцієнти заломлення матеріалів й, відповідно, коефіцієнти відбиття пластин. Цей недолік схеми практично повністю може бути компенсований відповідною технологією виготовлення калібровочно-випробувальних стендів.

У випадку використання випромінювачів з ослабленням світла при дзеркальному відбитті, коефіцієнтом поглинання α яких можна зневажити, пропускання τ відповідно до закону збереження енергії $\tau = 1 - \rho - \alpha$ визначається в основному френелівським відбиттям

$$\rho(n_c, \varphi) = \left(\frac{\sqrt{n_c^2 - \sin^2 \varphi} - \cos \varphi}{\sqrt{n_c^2 - \sin^2 \varphi} + \cos \varphi} \right)^2,$$

де n_c – показник заломлення середовища, через яке проходить світло, φ – кут падіння променя. Залежно від того, чи змінюється коефіцієнт відбиття ρ дискретно або неперервно можуть бути отримані східчасті або безперервні ослаблювачі світла. Спосіб і пристрій для одержання клинових тонкошарових покриттів описані в роботі [30].

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Зміну коефіцієнта пропускання дзеркального освітлювача можна здійснювати:

- застосуванням матеріалів з різними відбивними властивостями,
- підбором товщини відбиваючого покриття,
- зміною кута φ падіння світлового променя.

Прагнення підвищити величину коефіцієнта ослаблення привело до ідеї використати дзеркальне відбиття від поверхні, що розділяє прозорі для випромінювання, яке послаблюється, речовини [25], наприклад: скло – рідина, скло – скло. Різниця показників заломлення двох речовин, що граничать, визначає величину ослаблення. З'являється можливість не тільки підвищити коефіцієнт ослаблення, але й значно урізноманітнити ослаблювачі по величині коефіцієнтів ослаблення, тобто збільшити число градацій при використанні даного способу. Це підтверджується наявністю достатнього числа рідин й оптичних матеріалів, добре вивчених з погляду оптики, а також досить добре розробленої методики виміру показників заломлення речовин. Для усунення технологічних труднощів виготовлення ослаблювача його робочі поверхні рекомендується встановлювати так, як це показано на рис. 2.2. Ослаблювач має рідинні прошарки 2 між призми 1 й 3. Показники заломлення призм однакові n_1 , а шар рідини має іншу величину показника заломлення n_2 ($n_1 \geq n_2$). Поверхні, що відбивають випромінювання, взаємно перпендикулярні, що робить систему нечутливою по коефіцієнту ослаблення до поляризації падаючого випромінювання.

Коефіцієнт ослаблення можна знайти, використовуючи формулу Френеля для випадку, коли площина падіння неполяризованого променя AO перпендикулярна до площини відбитого променя $O'B$. Кут падіння для даного пристрою можна вважати величиною постійної, а кут заломлення залежить від співвідношення показників заломлення двох речовин, що й визначає в остаточному підсумку коефіцієнт ослаблення. Неважко помітити, що промінь AO , який ослаблюється, два рази відбивається від

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

двох плоскопаралельних шарів рідини, тому промінь $O'B$ складається із чотирьох практично рівних по інтенсивності променів. Не слід в такій схемі зневажати поглинанням і розсіюванням випромінювання в склі й у тонких шарах рідини, що вносить додаткові похибки.

Можливі конструктивні варіанти ослаблювачів, де кут падіння випромінювання, що ослаблюється, близький до нуля. Це дозволяє виключити можливі інтерференційні ефекти при відбитті випромінювання від тонких шарів.

В [31] наведені дані, що використовуючи трьохполяризаційну систему з точністю відліку кутів повороту аналізатора $6''$, можна одержати необхідний високопрецизійний калібрований освітлювач світла. При цьому дотримуються всі вимоги фотометричного ослаблення світла для системи, складеної з поляризаційних призм.

Полярійний поляризаційний освітлювач завдяки явищу дихроїзму полярійів може володіти виборчим поглинанням світла [32]. Крім того, полярійна плівка протягом часу може змінювати свої характеристики.

Існує також полярійний освітлювач, сконструйований із чотирьох нерухомих полярійів, площини поляризації яких паралельні одна одній, і трьох обертових фазових пластинок, кожна з яких поміщена між двома нерухомими поляріями. За твердженням авторів [33], ця конструкція випромінювача з ослабленням світла дозволяє досягти величини оптичної щільності $D = 4,553$ ($\tau = 0,0028 \%$), має точність ослаблення вище, ніж конструкція освітлювача, складеного із трьох полярійів, і може з успіхом використатися для роботи в окремих зонах спектра.

Недосконалість поляризаторів, похибки технологічного складання освітлювача і відлікового пристрою аналізатора заважають поляризаційній системі ослаблення світлового потоку досягти розрахункових значень при великій оптичній щільності (малому коефіцієнті пропускання або великому коефіцієнті ослаблення).

Розглянемо наступний освітлювач, заснований на законі Тальбота.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Такий освітлювач має високу точність ослаблення $\Delta D = \pm 0,0003$ і невеликі (у порівнянні з попереднім) габарити, тому він широко використовується при вимірах та ослабленні світлових потоків. Набір секторних дисків відтворює значення оптичної щільності, що перебуває у діапазоні $D=0,699 \dots 2,257$. Подальше збільшення діапазону обмежене дифракційними втратами світла.

Пристрої подібного типу називають переривниками світла.

Широке поширення в якості неселективних освітлювачів безперервного випромінювання з можливістю ослаблення потоку світла одержали обертові сектори, які перекривають пучок випромінювання. Освітлювачі такого класу використовують разом з інерційними приймально-реєструючими системами. Коефіцієнт ослаблення $k = \frac{360^\circ}{\gamma^\circ}$ визначається кутом розкриття сектора γ° , що пропускає випромінювання на приймач. При практично граничному значенні коефіцієнта ослаблення $k = 10^3$. Точність ослаблення досягає (2 ... 3)% і визначається точністю виміру кута γ° .

Варіантом освітлювача з секторним ослабленням є освітлювач Бродхуна. У цьому пристрої обертається не диск навколо осі, а промінь навколо осі нерухомого диска. Промінь обертається двома призмами. Вірогідні поляризаційна дія і селективність пристрою можуть понизити його точність.

Такі освітлювачі застосовуються для перевірки старих денситометрів, але не можуть через обмеженість діапазону ослаблення світлового потоку використовуватися в якості зразкових для градування нових денситометрів та вимірювання ФПС БК ОЕСС, для яких потрібен широкий діапазон ослаблення ($k = 1 \dots 10^5$). Їм властиві мінливість апертури пучка променів, обумовлена зміною кута секторного вирізу в обертовому диску. Крім того, виконуючи вимоги по нейтральності ослаблення, незмінності оптичної довжини ходу променів, збереженню рівномірності

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

ослаблення по перетину пучка променів, стабільності й плавності ослаблення світла, цей ослаблювач має дифракційні втрати при збільшенні його оптичної щільності.

Застосування такого ослаблювача можливе тільки при умові використання інерційних ПВ, таких як око, болометр, тобто приймачів, які підкоряються закону Тальбота. Ослаблювач випромінювання для вимірювання енергетичних характеристик БК ОЕСС повинен узгоджено працювати з швидкодіючим БПВ, тому вже за цією ознакою калібрований ослаблювач, напевно, не може бути побудований на переривниках випромінювання.

Методи ослаблення світла, засновані на законі адитивності світлових потоків, використовуються в радіометрії при перевірці лінійності приймачів випромінювання, в спектрофотометрії, фотометрії та сенситометрії для градуювання й перевірки фотометричних шкал приладів. У спектрофотометричних пристроях широко використовуються фотометричні сітки, діафрагми, гребінки. Прагнення зменшити вплив нерівномірності щільності випромінювання на точність ослаблення привело до зміни конструкцій діафрагм [34] і гребінок. Відмітимо, для ослаблення випромінювання лазерів вони використовуватися не можуть без попереднього розсіювання випромінювання через великі перепади щільності енергії в промені. Сітки в деяких випадках використовуються для ослаблення випромінювання CO_2 -лазерів. В основному ослаблення здійснюється дискретно. Прикладом ослаблювача такого типу є набір дірчастих діафрагм, кожна з яких являє собою тонку почорнілу металеву пластинку із круглими отворами, рівномірно розподіленими на концентричних колах по її поверхні. В залежності від розміру й кількості отворів коефіцієнт пропускання такої діафрагми може бути різним. В загальному випадку він дорівнює відношенню площі, займаної отворами, до площі всієї пластинки. Такий ослаблювач може відтворити діапазон оптичної щільності $D=0\ldots 2,6$, $\tau=1\ldots 0,25\times 10^{-2}$. Набір дірчастих діафрагм знайшов застосування в спектросенситометрах ІСП-73 та ФСР-9.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Великий перепад оптичної щільності або великий діапазон коефіцієнта ослаблення при високому ступені нейтральності одержують за допомогою модулятора освітленості на сітчастих ослаблювачах, які показані на рис. 2.4, такі ослаблювачі знайшли практичне застосування, наприклад, у сенситометрі СР-23 і світлодозаторі [35].

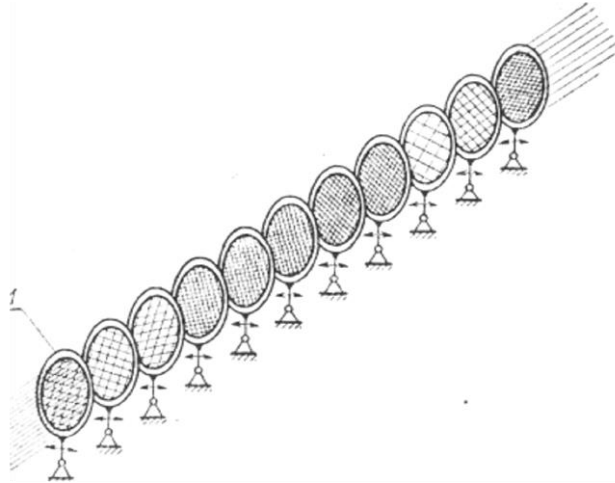


Рисунок 2.4 - Сітчастий ослаблювач світла

Варто відмітити, що при всіх перевагах відносно вимог до фотометричного ослаблювача набір з декількох чорнених металевих сіток внаслідок явища, що обумовлює муарову картину після ослаблювача, а також багаторазового відбиття між поверхнями окремих сіток, уведених у світловий пучок, не може бути відкалібрований розрахунковим шляхом за законом адитивності. Відомо, що на рівні щільності $D = 5$ відхилення від розрахункового значення для цих ослаблювачів може досягати $\Delta D = 0,02$ [35].

У теперішній час розроблені вакуумні покриття, які наносяться на існуюче гальванічний покрив сіток і дозволяють зменшувати коефіцієнт відбиття від сіток, знижуючи тим самим вплив їх одна на одну при введенні у світловий пучок.

Для виготовлення безперервних сенситограм, використовуваних в автоматичних реєструючих денситометрах і мікроденситометрах, були запропоновані освітлювачі з ослабленням світла, принцип роботи яких

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

представлений на рис. 2.5.

Геометричний ослаблювач світла (рис. 2.5, а) [31] має вигляд прямокутного паралелепіпеда 7, усередині якого половина простору перекрита засувкою 6, що перебуває в площині уявного перетинання діагоналей 5. Торцеві протилежні грані, паралельні заслінці 6, виконують функції вхідної й вихідної щілин ослаблювача. Уздовж вхідної щілини рухається засувка 3, задаючи на виході певний закон ослаблення світла. Світло від лампи 1 на вхідній щілині ослаблювача формується при допомозі циліндричного конденсора 2.

Ослаблювач (рис. 2.5, б) представляє собою комбіновану систему, що працює на основі закону Бугера і закону адитивності світлових потоків. Схема реалізована у сенситометрі, освітлювальна частина якого представляє собою джерело випромінювання 1 із циліндричною лінзою 2 й ослаблювач, у конструкцію якого входить комплект плоских багатоелементних механічних модуляторів освітленості 3 і світлопроводів 4. ПВ 5 є фотоматеріалом.

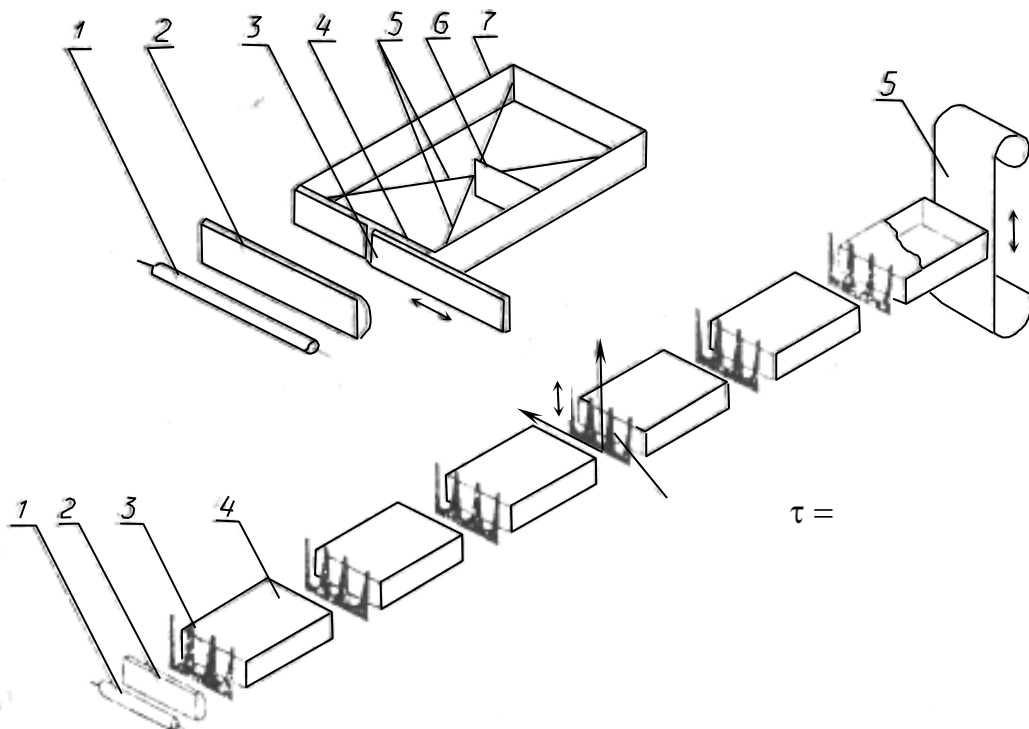


Рисунок 2.5 - Геометричні ослаблювачі світла

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Ослаблення за законом Бугера здійснюється модуляторами, кожний з яких являє собою гребінку. Профіль зубця гребінки відповідає експоненті. Введення модулятора у світловий потік уздовж осі зубця експоненційно послабляє світло відповідно до формули $\tau = e^{-k \cdot x}$, де k – показник ослаблення світла на одиницю довжини переміщення зубця, x – величина переміщення зубця. Світлопровід служить для гомогенізації світлового потоку.

Введення у світловий пучок тієї або іншої кількості модуляторів забезпечує плавне регулювання ослаблення.

Найбільше розповсюджені освітлювачі з каліброваним ослабленням світла, засновані на вже згадуваному законі Бугера – Ламберта – Бера (так звані поглиначі). Поглинаючі середовища – найбільш широкий клас ослаблювачів. Сюди входять ослаблювачі, засновані на поглинанні в газах, рідинах й твердих матеріалах. Існують ослаблювачі на поглинанні в газах для інфрачервоного випромінювання CO²-лазера. У газовому ослаблювачі як поглинаюче тіло використовується примусово циркулюючий по замкнутому контурі газ C₃H₃, C₃H₈ або SF₆. Є пристрій для заповнення й циркуляції газу. Вікна для введення та виводу енергії випромінювання зроблені з NaCl. Прилад випробовувався при потужності не більше 100 Вт. Коефіцієнт ослаблення змінюється плавно в межах від 1х до 100х, залежно від зміни тиску газу.

Для ослаблення незначних потужностей у видимій області використовують нейтральні фільтри й фотометричні клини. Використання ослаблювача при роботі в білому світлі можливо тільки у випадку його нейтральності. Велика кількість нейтральних фільтрів дає велику похибку ослаблення і тому не може використовуватися при точних вимірах.

Фотометричний клин може бути виготовлений різними способами. В астрофотометрах застосовують, клин, зроблений з димчастого скла, склеєний із клином із прозорого скла. У дензографі Гольдберга

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

застосований клин із профарбованого чорною фарбою желатину, який наливо на скло. У мікрофотометрі Гартмана – клин виготовлено з фотографічної емульсії на склі. Застосовують також круговий клин Віганда, що складається із шару речовини, що розсіює, нанесеного на скляний диск, причому товщина шару, що розсіює, росте по гвинтовій лінії. Використовуються також і платиновані клини.

Варто помітити, що клин є простим і зручним елементом з нормованим ослабленням світла, який дозволяє вимірювати оптичні щільності до $D = 6,0$, що цілком природно й обґрунтовано те велике застосування, що одержав цей ослаблювач. Поглинання світла в певному місці клину є функцією відстані x від одного з кінців клину й константи клину K . У точці x товщина поглинаючого шару $y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha$, де α – кут клина. Інтенсивність I випромінювання, що пройшло поглинаючий шар, пов'язана з інтенсивністю падаючого світла I_0 формулою:

$$\ln \left(\frac{I}{I_0} \right) = -K \cdot x, \text{ де } K - \text{константа клину.}$$

Коефіцієнт ослаблення таких пристроїв досягає 10^4 .

Якщо нейтральність клину залежить тільки від природи барвника, то лінійність (сталість константи клину по всій його довжині) залежить не тільки від механічної точності виконання клина, але й від того, чи дотримується для цього барвника закон Бера. Експериментальні результати вимірювань лінійного клину зі скла НС-9 наочно показують лінійність і великий хроматизм клину – зміну константи клину в залежності від спектрального складу падаючого на нього випромінювання [31].

Таким чином, спектральна селективність ослаблювачів світла, виготовлених із суміші декількох барвників і зі скла, профарбованого в масі, може сильно вплинути на результат виміру великої оптичної щільності, хоча при вимірі малих оптичних густин цей недолік мало істотний.

Дослідження порушення закону Бугера при вимірі немонохроматичного випромінювання показало, що нейтральне

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

світлопоглинання має колоїдний графіт не занадто високої дисперсності й срібло фотографічного почорніння. При підходящому ступені дисперсності обидві ці речовини поглинають світло в достатній мірі невибірково для $\lambda > 450$ нм. При $\lambda < 450$ нм поглинання графіту зазвичай трохи зростає, а срібла трохи падає, тобто графіт виявляється на просвіт злегка жовтуватим, а срібло – блакитнуватим [31].

Розходження в показниках заломлення матеріалів скляного клину й безбарвного противоклину, які один з одним склеюються, може привести до зсуву променя на приймачі світла при переміщенні клина, а відсутність противоклину, яке має місце у вимірювальних клинів мікрофотометра ИФО-451, спричиняє не тільки зсув променя, але і його розфокусування на приймачі світла через різнотовщинність клину.

Існують також нейтрально-сірі металічні шари з оптичною щільністю $D=2$ ($\tau=1\%$), які, як і речовини, що являють собою механічні суспензії, розсіюють світло. Область нейтральності таких ослаблювачів від 240 нм до 2,6 мкм при максимальному відхиленні $\Delta D = 0,086$ ($\frac{\Delta \tau}{\tau} = 18\%$).

У фотометрії для ослаблення й порівняння пучків світла широко використовуються властивості екранів, що розсіюють, застосовуються фотометричні кулі різних конструкцій, растрові екрани, дифракційні ґрати – так звані розсіювачі. Недостатньо висока точність і надійність ослаблення не дозволяють використати растрові екрани й дифракційні ґрати для цілей фотометричного ослаблення.

В [36] описані схеми по ослабленню випромінювання лазерів у видимій області. Використовуються екрани, що дифузно-розсіюють, з Mg або BaSO₄. Схема установки для ослаблення наведена на рис. 2.6.

Ослаблення розраховується по формулі $k = \frac{\pi \cdot R^2}{S \cdot \rho}$ при $\vartheta \leq 10^\circ$, де R – відстань від екрану, що розсіює, до ПВ, S – площа вхідного отвору приймача, ρ - коефіцієнт відбиття екрану. Так як відстань R довільна й

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

може мінятися в широких межах, коефіцієнт ослаблення можна довести до $10^7 \dots 10^8$, але верхня межа для коефіцієнта ослаблення визначається площею отвору приймача, яка повинна бути досить великою для усереднення пелюстків діаграми спрямованості «плямистої» просторово-інтерференційної картини від поверхні, освітленої лазером. Крім цього, при великому коефіцієнті ослаблення фонове світло може бути сильніше корисного сигналу.

В деяких фотометрах використовується екран, що розсіює, з емалі. Верхні межі вимірюваної енергії й потужності випромінювання визначаються міцністю застосовуваного скла і емалі, що розсіює випромінювання.

Відомі схеми з використанням фотометричних куль [29, 37]. Світловимірювальна куля в якості ослаблювача використовується і для лазерів, і для звичайного випромінювання малої потужності і широкої діаграми направленості. Загальна теорія інтегруючої сфери приводиться в роботі [29].

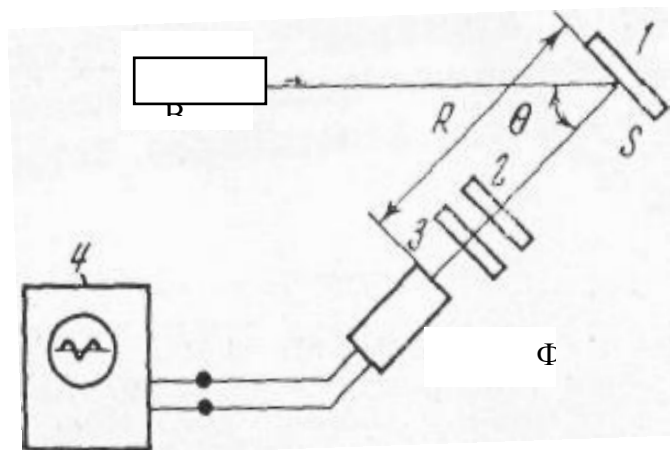


Рисунок 2.6 - Схема ослаблювача з екраном, що розсіює: 1 – дифузний відбивач із BaSO₄; 2 – нейтральний світлофільтр; 3 – інтерференційний фільтр; 4 – осцилограф

З неї теоретично випливає, що якщо коефіцієнт відбиття стінок сфери дорівнює 90 %, зміна коефіцієнта відбиття на 0,5 % призводить до похибки вимірювання у 5 %. Якщо селективність покриття невелика, то

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

селективність всієї сфери значно більше. Це, звісно, недолік таких схем, але схеми з інтегруючими сферами в якості каліброваного освітлювача для вимірювання функції передачі приймачів БК ОЕСС приваблюють тим, що задовольняють декільком важливим поставленим на початку вимогам, а саме:

- мають високу однорідність яскравості вихідної зіниці кулі за рахунок ефекту інтегрування;
- можливість одночасного засвічування великої кількості пікселів БПВ при значному розмірі вихідної зіниці сфери;
- невеликі габарити;
- незмінність апертури пучка світла, що ослаблюється, тобто сталістю геометрії поля зору приймача світла;
- рівномірне ослаблення по перетину ослаблюваного пучка;
- можливість досягнення великих значень яскравості вихідної зіниці сфери.

Для реалізації поставленої задачі створення освітлювача з каліброваним ослабленням випромінювання для атестації БПВ цікавими являються дві схеми комбінації освітлювача на фотометричній кулі та на законі зворотних квадратів і освітлювача на двох сферах і законі адитивності. Схеми відзначених освітлювачів наведені на рис. 2.7, 2.8 відповідно.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

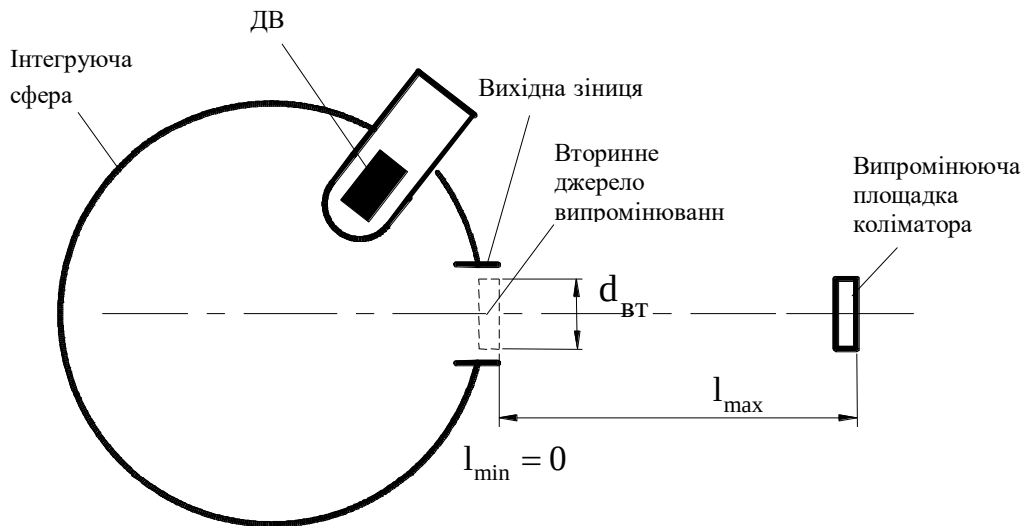


Рисунок 2.7 - Ослаблювач, побудований на інтегруючій сфері та законі зворотних квадратів

Такий ослаблювач може мати декілька ДВ. Бажано, щоб використовувані ДВ мали стабільні енергетичні параметри та широку індикатрису випромінювання для більш рівномірного розподілу яскравості по полю вихідної зіниці. При застосуванні стійких і неселективних покриттів та неселективної пластинки, що розсіює, спектральна щільність енергетичної яскравості на ПВ матиме найбільш стабільний розподіл, а також найбільшу повторюваність при кількох вимірюваннях. Досить великий розмір вихідної зіниці інтегруючої сфери дозволяє створити на випромінюючій площадці коліматора більш рівномірний розподіл освітленості, ніж у схемі з безпосереднім освітленням за законом зворотних квадратів. Коефіцієнт ослаблення буде розраховуватися за формулою для закону зворотних квадратів: $\tau = \frac{l_1^2}{l_2^2}$, де l_1 і l_2 – початковий та наступний відлік відстаней між вихідною зіницею фотометричної кулі та площадкою, що дифузно розсіює. Слід відмітити, що при малих відстанях між вихідною зіницею і випромінюючою площадкою коліматора указаний закон порушується [21].

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

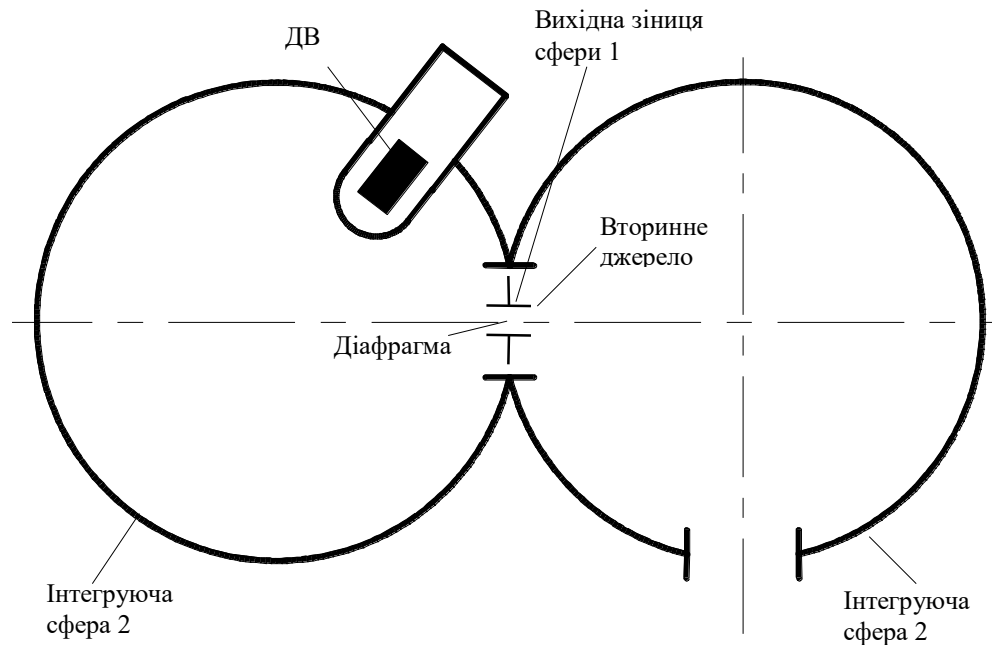


Рисунок 2.8 - Ослаблювач, побудований на комбінації двох сфер і набору діафрагм

Схема з двома сферами та набором каліброваних діафрагм є однією з найбільш перспективних для застосування у метрологічній установці енергетичної атестації БК ОЕСС. У даній схемі випромінюваний джерелом потік двічі усереднюється за рахунок інтегрування двома сферами. Яскравість вихідної зіниці другої кулі можна змінювати за допомогою варіювання площею діафрагми, через яку випромінювання з першої сфери поступає у другу, тобто на законі адитивності

До класу ослаблювачів, що розсіюють, відносяться комірчасті екрани. Комірчасті екрани виготовляються на сталевій підкладці видавлюванням каліброваною сталевую кулькою лунок з наступним їхнім шліфуванням і поліруванням. Інша конструкція ослаблювача збирається з великої кількості кульок, бічні грані яких зашліфовані, а робочі поверхні покриті Al або Au вакуумним напилюванням. Експериментальні дослідження мікропрофілю й геометрії осередків показали можливість використання ослаблювача в тілесному куті розсіювання $\sim \pi$. Розрахунок ослаблення неможливий при складній структурі індикатриси розсіювання. Достоїнство ослаблювача – неселективність, стійкість.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Ослаблювачі на спектральній селекції випромінювання у даній роботі детально не розглядаються, оскільки вони не задовольняють одній з найважливіших вимог. Розроблюваний ослаблювач обов'язково повинен працювати в певному спектральному діапазоні (0,4 ...1,8) мкм і чим більш постійними будуть спектральні параметри випромінювання, тим меншу похибку буде мати пристрій.

Для ІЧ області можливе використання освітлювача з секторним ослаблювачем або матових екранів з металів, а для збереження структури променя можливе використання френелівських освітлювачів з ІЧ матеріалів і тунельного ослаблювача в довгохвильовій області. У цей час, очевидно, виникла необхідність експериментального звірення ослаблювачів для виявлення їхніх похибок.

В таблиці 2.3 наведені відомі методи і засоби вимірювання ФПС БК ОЕСС і застосовувані у них каліброваних інтегральних освітлювачів.

2.1.1.2 Ослаблювачі оптичного випромінювання

Таблиця 2.3 - Методи і засоби вимірювання ФПС БК ОЕСС

Назва установки для вимірювання ФПС	Закон, за яким здійснюється регулювання яскравості	Динамічний діапазон енергетичної яскравості	Тип джерела випромінювання	Діапазон СЩЕЯ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}}$	Джерело інформації	Спектральний діапазон, мкм	Похибка абсолютного градування
Універсальна перевірна установка „Камелія”	Закон зворотних квадратів відстаней	10^5	Галогенна лампа	12 - 214	[38]	0,4 – 1,2	3,5 %
Комплекс вимірювальний метрологічний КВМ 0,3-15		115 – 250		10 – $5,5 \cdot 10^8$	[39]	0,3 – 15	$\pm 5\%$
Устаткування для оптичного тестування БК ОЕСС (SOTU) фірми Jena-Optronik	Дискові нейтральні фільтри	100 – 250	КВГ лампа		тех. опис	0,25 – 2,0	$\pm 5\%$
Стенд лабораторії ДНДП „КОНЕКС”	Закон зворотних квадратів відстаней	(до $3 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$)	Галогенна лампа КГМ-30-300-2		[40]		7,12 %

2.1.1.3 Основні фотометричні співвідношення

Для кількісного порівняння найбільш перспективних схем побудови інтегрального випромінювача з каліброваною яскравістю необхідно визначити по відомим габаритним та фотометричним параметрам первинного ДВ рівень та розподіл яскравості (або освітленості) у площині вторинного випромінювача (випромінюючої площадки коліматора).

Розглянемо варіант схеми з безпосереднім опроміненням випромінюючої площадки коліматора. Можливі два варіанта реалізації такого методу:

1) освітлювач і опромінювана площадка знаходяться на значній відстані, тому джерело випромінювання можна вважати точковим;

2) освітлювач і опромінювана площадка знаходяться на відстані сумірній з розміром випромінювача, тому джерело випромінювання не можна вважати точковим і розрахунок освітленості у будь-якій точці опромінюваної площадки необхідно виконувати, як від рівномірно яскравої поверхні на іншу поверхню.

Перший випадок є досить простий, оскільки на значних відстанях величина освітленості опромінюваної площадки змінюється відповідно до закону зворотних квадратів відстаней. Другий варіант має дещо складніший аналітичний опис.

Розглянемо найбільш загальний випадок, коли випромінююча та опромінювана площадки мають будь-яку форму та вільно орієнтовані в просторі, і не є паралельні або перпендикулярні.

Освітленість в точці А, що створюється випромінюючим елементом dS , до якого можна застосувати закон зворотних квадратів, визначиться так:

$$dE_{\text{вт}} = \frac{dI_{\alpha} \cdot \cos \beta}{l^2}, \quad (2.1)$$

2.1.1.3 Основні фотометричні співвідношення

де dI_{α} – сіла світла випромінюючого елемента у напрямку до розрахункової точки; β – кут між напрямком сили світла в розрахункову точку та нормаллю до освітлюваної площини; l – відстань від випромінюючого елемента до розрахункової точки.

Вважаючи випромінюючу поверхню ламбертівською, рівняння (2.1) можна переписати у вигляді:

$$dE_{\text{вт}} = \frac{L_{\text{л}} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{l^2} = L_{\text{л}} \cdot \cos \beta \cdot d\omega,$$

де $L_{\text{л}}$ – яскравість випромінюючої площадки (тіла розжарення лампи); $d\omega$ – елементарний тілесний кут, під які видний випромінюючий елемент dS з розрахункової точки A .

У роботі [33] показано, що освітленість у будь-якій точці опромінюваної площини (випромінюючої площадки коліматора) від усієї випромінюючої поверхні визначається за формулою:

$$E_{\text{вт}} = L_{\text{л}} \cdot \sigma, \quad (2.2)$$

де σ – проекція вектора тілесного кута, під яким спостерігається випромінююча поверхня (тіло розжарення лампи) з точки, для якої ведеться розрахунок освітленості, на напрямок, перпендикулярний освітлювальній площині. Величина σ визначається методом контурного інтегрування і дорівнює:

$$\sigma = \oint_L \frac{d\varphi}{2} \cos \beta, \quad (2.3)$$

де L – довжина контуру випромінюючої поверхні; $d\varphi$ – елементарний кут між двома направляючими кінчної поверхні з вершиною у точці A , що спирається на випромінюючу поверхню довільного контуру.

Отже, з розглянутого видно, що освітленість, створювана рівнояскравою поверхнею, визначається яскравістю цієї поверхні та проекцією вектора тілесного кута на напрямок нормалі до освітлюваної площини.

2.1.1.3 Основні фотометричні співвідношення

Виконаємо дослідження більш конкретизованого випадку для схеми з безпосереднім опроміненням випромінюючої площадки коліматора. Нехай тіло розжарення первинного ДВ (галогенної вольфрамової лампи) має круглу форму з радіусом $r_{\text{л}}$, колірну температуру $T_{\text{к}}$, і рівномірно випромінює в тілесному куті 4π ср енергетичний потік $\Phi_{\text{л}}$. Припустимо, що опромінювана площадка розташована паралельно до випромінюючої і також має круглу форму з радіусом $r_{\text{пл}} \gg r_{\text{л}}$ (хоча останнє припущення не є вирішальним у подальших міркуваннях). Очевидно, що існує деяка мінімальна відстань l_{min} , на якій можуть розташовуватися випромінююча та опромінювана площадки одна відносно одної (рис. 2.9). Є також зрозумілим, що при умові сумірності l_{min} з розміром випромінювача $2r_{\text{л}}$ таке джерело не можна вважати точковим, і розрахунок освітленості у будь-якій точці опромінюваної площадки необхідно виконувати, як від рівномірно яскравої поверхні на поверхню.

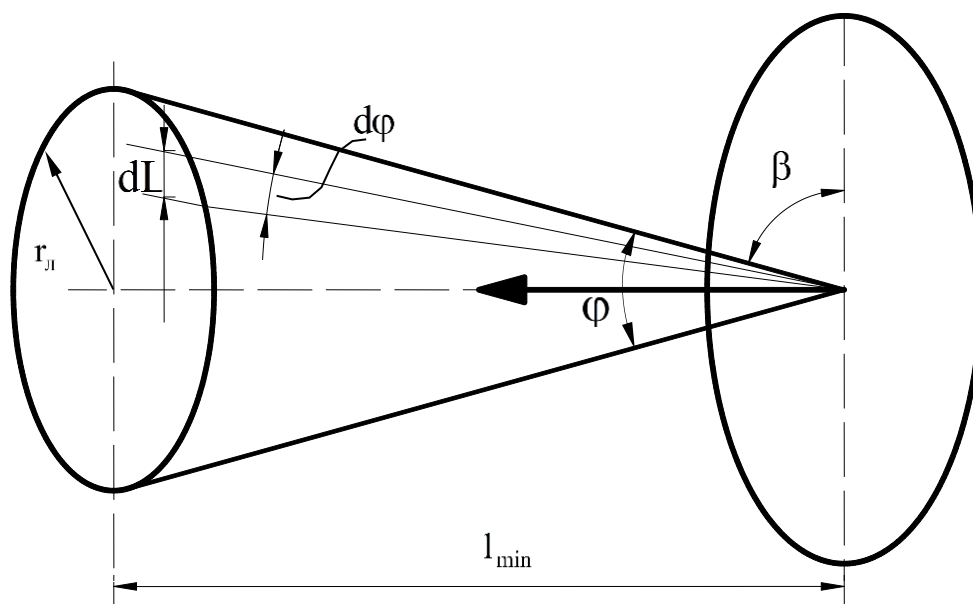


Рисунок 2.9 - До розрахунку освітленості від випромінюючого диска

У відповідності до попередніх викладок (формули (2.2), (2.3)), освітленість у точці, що співпадає з проекцією центра випромінюючого диска на освітлювану поверхню, визначиться наступним чином:

2.1.1.3 Основні фотометричні співвідношення

$$E_{\text{вт}} = L_{\text{л}} \cdot \oint_L \frac{d\varphi}{2} \cos \beta. \quad (2.4)$$

З рис. 2.9 видно, що

$$\cos \beta = \sin \frac{\varphi}{2} = \frac{r_{\text{л}}}{\sqrt{r_{\text{л}}^2 + l_{\text{мін}}^2}}; \quad d\varphi = \frac{dL}{\sqrt{r_{\text{л}}^2 + l_{\text{мін}}^2}}.$$

Підставляючи вирази для $\cos \beta$ і $d\varphi$ у попередню формулу (2.4) та інтегруючи по контуру випромінюючого диска, отримаємо:

$$E_{\text{вт}} = \frac{L_{\text{л}}}{2} \cdot \frac{r_{\text{л}}}{r_{\text{л}}^2 + l_{\text{мін}}^2} \cdot \oint_L dL = \frac{\pi L_{\text{л}} \cdot r_{\text{л}}^2}{r_{\text{л}}^2 + l_{\text{мін}}^2} = \pi L_{\text{л}} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (2.5)$$

Аналогічна формула наведена і у [41]. Вираз (2.5) справедливий і для розрахунку освітленості в інших точках, що лежать у площині, паралельній площині випромінюючого диска, але не співпадають з проекцією центра випромінюючого диска з на освітлювану площину.

Як правило, при розробці інтегрального випромінювача оцінюють не освітленість, створювану рівнояскравою випромінюючою поверхнею на опромінюванні $E_{\text{вт}}$, а яскравість вторинної поверхні $L_{\text{вт}}$. Тому для зручності подальших розрахунків знайдемо яскравість опромінюваної площадки у точці, що співпадає з проекцією центра випромінюючого диска на освітлювану поверхню:

$$L_{\text{вт}} = \frac{E_{\text{вт}}}{\pi} = \frac{L_{\text{л}} \cdot r_{\text{л}}^2}{r_{\text{л}}^2 + l_{\text{мін}}^2} = L_{\text{л}} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}. \quad (2.6)$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС

Вихідні дані можуть для розрахунку бути сформульовані на основі вимог, які висуваються до методів вимірювання ФПС та досвіду попередніх подібних розробок.

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

У якості ДВ може бути використана галогенна лампа КГМ-30-300-2, яка була як ДВ інтегрального випромінювача запропонована у стенді для перевірки БК ОЕСС в оптичній лабораторії ДНДП "Конекс". Така лампа при температурі вольфрамового тіла розжарення $T_k = 3200\text{K}$ має наступні характеристики:

- габаритна яскравість $L_r = 35 \cdot 10^6 \frac{\text{Кд}}{\text{м}^2}$;
- світловий потік у куті 4π стерадіан $\Phi = 9000 \text{ лм}$;
- розміри тіла розжарення $s_d \times h_d = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;
- габарити колби $s_k \times h_k = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \times 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$;
- колірна температура $T_k = 3200\text{K}$;
- електрична потужність $P = 300 \text{ Вт}$.

Спектральний діапазон, у якому повинен працювати ослаблювач $\lambda = (0,4 \dots 1,8) \text{ мкм}$. Бажано, щоб у даній спектральній області калібрований випромінювач був неселективним і не спотворювався спектр температурного ДВ.

Динамічний діапазон яскравості випромінюючої площадки коліматора $\frac{L_{\max}}{L_{\min}} = 10^5$.

Коефіцієнт пропускання випромінюючої площадки коліматора $\tau = 0,5$.

Діаметр випромінюючої площадки коліматора не менше, ніж $d_{\text{кол}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Як уже відмічалось, бажано досягти величини яскравості випромінюючої площадки коліматора, рівної $L_{\text{вих}}^{\max} = 1500 \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$.

Для схеми з використанням поляризаторів можна прийняти

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

коефіцієнт пропускання поляризаційної пластинки $\tau_{\Pi} = 0,1$.

Для схеми, де застосовується сітчастий ослаблювач, будемо вважати, що:

- коефіцієнт пропускання рівномірний по всій площині сітки і дорівнює $\tau_c = 0,5$;
- осьова товщина сітки $d_c = 0,001\text{ м}$.

Для схем, де використовуються лінзові системи, зокрема у якості конденсора, узагальнені параметри оптичної системи наступні:

- збільшення $\beta = -2^x$;
- тип конденсорної системи – симетрична лінза;
- відносний отвір конденсора $\frac{D_k}{f'_k} = \frac{1}{1}$. Такий відносний отвір мають

тільки дуже світлосильні оптичні системи, але взято саме таке значення для визначення максимальних можливостей схем.

Параметри фотометричних куль, що застосовуються у каліброваному освітлювачі:

- радіус сфери $R_{\text{сф}} = 0,1\text{ м}$;
- радіус вихідної зіниці сфери $R_z = 0,025\text{ м}$;
- коефіцієнт дифузійного відбиття внутрішньої поверхні сфери $\rho = 0,95$.

Відомо, що вищеназвані галогенні лампи КГМ-30-300-2 мають досить високу вартість і невеликий термін експлуатації. Тому для подовження періоду працездатності ламп їх використовують при зниженій напрузі, яка відповідає температурі тіла розжарення $T = 2850\text{ К}$. У паспортних даних на указану лампу наведений інтегральний потік $\Phi = 9000\text{ лм}$, який випромінюється лампою при температурі вольфрамового тіла розжарення $T = 3200\text{ К}$, а працює вона при іншій, отже необхідно виконати перерахунок фотометричних характеристик для температури $T = 2850\text{ К}$.

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

1. Розрахунок спектральної щільності випромінювання АЧТ при $T=2850$ К проводиться за формулою Планка:

$$M_{\text{АЧТ}}(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}, \quad (2.7)$$

де $C_1 = 3,7415 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{мкм}^4}{\text{см}^2}$, $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – коефіцієнти;

$\lambda = (0.45 \dots 8.5) \text{ мкм}$ – довжина хвилі.

2. Розрахунок спектральної щільності випромінювання вольфраму:

$$M_B(\lambda) = M_{\text{АЧТ}}(\lambda) \cdot \varepsilon_B(\lambda), \quad (2.8)$$

де $\varepsilon_B(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання вольфраму при заданій температурі, який можна розрахувати теоретично для ІЧ області за

формулою Рубена-Хагенса-Друде $\varepsilon_B(\lambda) = 0,0221 \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot T}{\lambda_{\text{см}}}}$, де

$\rho_0 = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – питомий опір вольфраму при $T=273$ К, або $\varepsilon_B(\lambda)$ можна взяти з графіків [42]. Другий варіант дає більш точні результати, оскільки отримані експериментально і відповідають реальним властивостям вольфраму. Але дані про коефіцієнт випромінювання вольфраму в [42] наведені тільки для спектральної області від до $\lambda = 2,8 \text{ мкм}$, тому для довжин хвиль до $\lambda = 8,5 \text{ мкм}$ $\varepsilon_B(\lambda)$ можна отримати тільки теоретично.

3. Розрахунок відносної спектральної характеристики вольфрамової лампи:

$$\Phi_B(\lambda) \cong \frac{M_B(\lambda)}{M_B(\lambda)_{\text{MAX}}} = \frac{\varepsilon_B(\lambda) \cdot M_{\text{АЧТ}}(\lambda)}{[\varepsilon_B(\lambda) \cdot M_{\text{АЧТ}}(\lambda)]_{\text{MAX}}}. \quad (2.9)$$

4. Розрахунок відносної спектральної характеристики вольфраму з урахуванням спектральної чутливості ока, що визначається формулою:

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

$$V(\lambda) = A \cdot \lambda^{-m} \cdot e^{-\frac{n}{\lambda}}, \quad (2.10)$$

де коефіцієнт A визначається з виразу $\log(A) = 32,4107$, $m = 182,1905$, $n = 100,9370$.

Тоді спектральна характеристика визначається виразом:

$$\overset{\circ}{\Phi}_B^{\text{вид}}(\lambda) = \overset{\circ}{\Phi}_B(\lambda) \cdot V(\lambda) \quad (2.11)$$

5. Розрахунок максимального значення спектральної характеристики вольфраму Φ_B^{MAX} :

$$\Phi_B^{\text{MAX}} = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overset{\circ}{\Phi}_B^{\text{вид}}(\lambda) d\lambda} = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overset{\circ}{\Phi}_B(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (2.12)$$

де $\Phi_v = 3082,2$ лм – світловий потік лампи для температури $T = 2850$ К, який отриманий з потоку $\Phi = 9000$ лм, який визначений в паспорті для температури $T = 3200$ К, шляхом множення на певний коефіцієнт.

6. Визначення абсолютних значень потоку випромінювання:

$$\Phi_B(\lambda) = \Phi_B^{\text{MAX}} \cdot \overset{\circ}{\Phi}_B(\lambda) \quad (2.13)$$

7. Визначення повного (інтегрального) потоку лампи Φ_B :

$$\Phi_B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_B(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_B^{\text{MAX}} \cdot \overset{\circ}{\Phi}_B(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (2.14)$$

Числове інтегрування у межах від $\lambda_1 = 0,4 \text{ мкм}$ до $\lambda_2 = 8,5 \text{ мкм}$ дає наступну величину повного енергетичного потоку, який випромінює галогенна лампа при температурі $T = 2850$ К: $\Phi_B = 130 \text{ Вт}$.

Схема ослаблювача з безпосереднім освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней наведена на рис. 2.10.

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

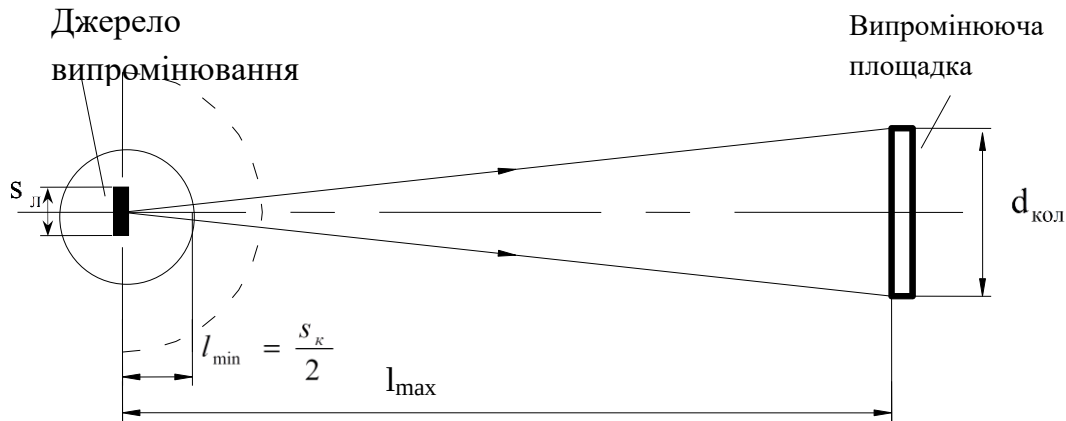


Рисунок 2.10 - Схема інтегрального випромінювача з безпосереднім опроміненням площадки коліматора за законом зворотних квадратів

Така схема має декілька особливостей:

- Галогенна лампа випромінює потік у тілесному куті 4π ср., але корисним є тільки частина потоку, що розповсюджується у куті 2π ср. у напрямку розташування випромінюючої площадки коліматора. Тобто у розрахунках необхідно використовувати величину, що становить половину від розрахованого вище енергетичного потоку: $\Phi_B / 2$.
- У ближній зоні спостерігається відхилення залежності яскравості від закону зворотних квадратів [21].

Найменша відстань, на якій може розташовуватися випромінююча площадка коліматора від ДВ, становить половину діаметра колби, що

є очевидним з рис. 2.10: $l_{\min} = s_k / 2$.

Яскравість тіла розжарення лампи КГМ-30-300-2:

$$L_n = \frac{\Phi_B / 2}{\pi \cdot s_n \times h_n} = \frac{130 / 2}{3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \times 6 \cdot 10^{-3}} = 9,852 \cdot 10^5 \frac{Вт}{ср \cdot м^2}.$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

Для спрощення розрахункових формул замінимо прямокутну форму тіла розжарення лампи на круглу, але при цьому випромінююча площа тіла розжарення повинна бути постійної: $S_{\text{л}} = s_{\text{л}} \times h_{\text{л}} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Радіус круглого еквівалентного тіла розжарення лампи повинен дорівнювати при цьому:

$$r_{\text{л}} = \sqrt{\frac{A_{\text{л}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-5}}{3,14}} = 2,585 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Розглянемо два випадки:

а) випромінююча площадка коліматора перебуває на великій відстані, де лампу розжарення можна вважати точковим джерелом, і освітленість, створювана точковим джерелом у центрі оберненої до лампи сторони випромінюючої площадки коліматора, формується за законом зворотних квадратів:

$$E_{\text{кол}}'(l) = \frac{I_{\text{л}}}{l^2},$$

де $I_{\text{л}}$ – сила випромінювання точкового джерела у напрямку до центру випромінюючої площадки коліматора.

Оскільки в першому наближенні припускаємо, що галогенна лампа випромінює рівномірно у всіх напрямках, то такий випромінювач можна вважати ламбертівським джерелом, а отже можна записати, що

$$I_{\text{л}} = A_{\text{л}} \cdot L_{\text{л}},$$

де $A_{\text{л}}$ – площа еквівалентного круглого тіла розжарення лампи.

З урахуванням коефіцієнта пропускання розсіювального екрану освітленість центральної точки випромінюючої площадки коліматора дорівнюватиме:

$$E_{\text{кол}}(l) = \frac{A_{\text{л}} \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{l^2}.$$

Тоді яскравість випромінюючої площадки коліматора буде залежати

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

від відстані між нею та первинним ДВ наступним чином:

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{E_{\text{кол}}}{\pi} = \frac{A_{\text{л}} \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} = \frac{\pi \cdot r_{\text{л}}^2 \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} = \frac{r_{\text{л}}^2 \cdot L_{\text{л}} \cdot \tau}{l^2} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}. \quad (2.15)$$

б) для випадку невеликих відстаней залежність яскравості центральної точки випромінюючої площадки коліматора, що має також круглу форму, від відстані до тіла розжарення лампи знаходимо, використовуючи вираз (2.6) та враховуючи коефіцієнт пропускання розсіювального екрану, який знаходиться у площині випромінюючої площадки коліматора:

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{л}} \cdot r_{\text{л}}^2 \cdot \tau}{l^2 + r_{\text{л}}^2} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}, \quad (2.16)$$

$$\text{де } l \geq \frac{s_{\text{к}}}{2} \Rightarrow l_{\text{min}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора (вторинного випромінювача) буде спостерігатися при мінімальній відстані до тіла розжарення лампи:

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l_{\text{min}}) = \frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{(7,5 \cdot 10^{-3})^2 + (2,585 \cdot 10^{-3})^2} = 5,232 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає свого мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{кол}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{5,232 \cdot 10^4}{10^5} = 0,523 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при

$$l_{\text{max}} = l(L_{\text{кол}}^{\text{min}}) = \sqrt{\frac{L_{\text{л}} \cdot A_{\text{л}} \cdot \tau}{\pi \cdot L_{\text{кол}}^{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5}{3,14 \cdot 0,523}} = 2,509, \text{ м (рис. 2.11).}$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

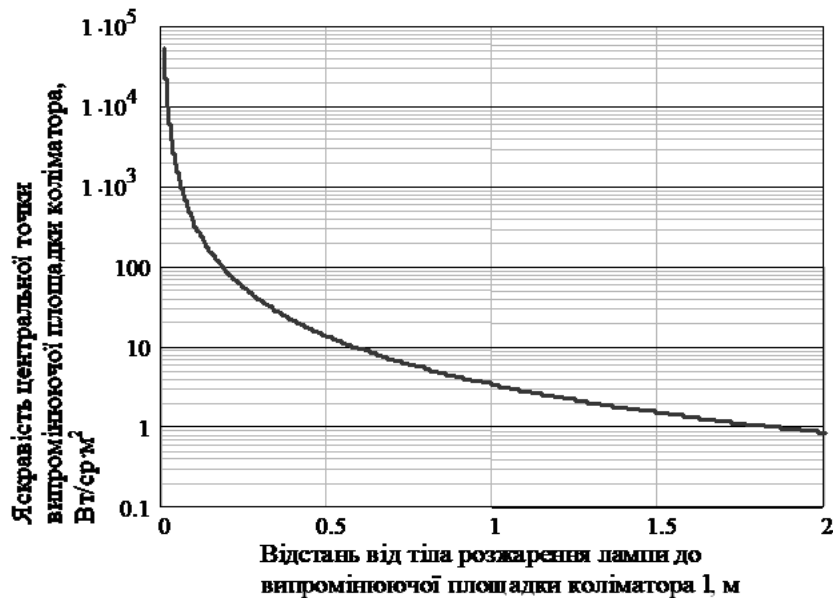


Рисунок 2.11 - Яскравість центральної точки випромінюючої
площадки коліматора

З наведеного рисунку видно, що зауваження про відхилення від закону зворотних квадратів у ближній зоні є справедливим. Можна також відмітити, що дана схема забезпечує досить високий рівень яскравості вторинного випромінювача, але досягнення бажаного динамічного діапазону яскравості вимагає великих відстаней від тіла розжарення лампи до випромінюючої площадки коліматора. Тобто така схема у реалізації має великі габарити (вже згадуваний недолік). Для зменшення габаритів установки можливе використання додаткових елементів ослаблення: неселективних нейтральних світлофільтрів з відомим коефіцієнтом пропускання, сітчастих ослаблювачів та ін.

Оцінку лінійної зони, у якій нелінійність розподілу яскравості по перетину вихідної зониці ослаблювача (у сагітальній та меридіональній площинах) не перевищує (1 ... 2) %, можна виконати за даними роботи [21], де наведені необхідні графіки. Найбільша нерівномірність розподілу яскравості по перетину випромінюючої площадки коліматора буде спостерігатися при мінімальній відстані від неї до тіла розжарення лампи $l_{\min} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. З відповідного графіку знаходимо розмір лінійної зони, де

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

яскравість змінюється на 2 %, дорівнює: $\Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{мін}}) = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На великій відстані випромінюючої площадки коліматора від тіла розжарення лампи розподіл яскравості по перетину вторинного випромінювача досить рівномірний, тому лінійною зоною можна вважати всю пластинку.

Інший критерій – енергетичний фактор K_e – добуток вихідної яскравості освітлювача на величину лінійної зони. Знайдемо вказану величину:

$$K_e = \Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{мін}}) \cdot L_{\text{кол}}(l_{\text{мін}}) = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 5,232 \cdot 10^4 = 94,176 \text{ Вт/м} \cdot \text{ср}.$$

Введемо умовний фактор, за яким можна оцінити габарити установки, – ймовірний об'єм, який буде мати установка, що реалізує даний метод регулювання яскравості інтегрального випромінювача. Є несумнівним, що будь-яка прецизійна або метрологічна установка при практичному втіленні потребує застосування оптичної лави, яка забезпечує високоточне взаємне орієнтування елементів установки та їх юстування. З [43] вибираємо стандартну висоту для оптичної лави верстатного профілю: $h_{\text{о.л}} = 0,09 \text{ м}$. Як правило, на оптичній лаві встановлюється рейтер, на якому розміщуються столи із закріпленими на них елементами. Прийmemo висоту рейтера рівною $h_p = 0,15 \text{ м}$. Вертикальний розмір самої установки прийmemo рівним $h_y = 0,1 \text{ м}$. Отже сумарна висота установки для прийнятих значень буде дорівнювати:

$$h = h_{\text{о.л}} + h_p + h_y = 0,09 + 0,15 + 0,1 = 0,34 \text{ м}.$$

Нехай ширина установки для схеми з безпосереднім опроміненням випромінюючої площадки коліматора буде рівною висоті: $h = s = 0,34 \text{ м}$.

Довжина ймовірного об'єму, що займає установка, визначається відстанню, на яку необхідно перемістити розсіювальну пластинку відносно первинного джерела для забезпечення динамічного діапазону яскравості 10^5 , тобто $l_{\text{max}} = 2,509 \text{ м}$.

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

Тоді габаритний фактор має значення:

$$V_g = h \cdot s \cdot l_{\max} = 0,34^2 \cdot 2,509 = 0,29 \text{ м}^3.$$

Габаритно-енергетичний фактор – відношення енергетичного фактора до об'єму, що необхідний для зміни у зазначеному діапазоні яскравості випромінюючої площадки коліматора за схемою з безпосереднім опроміненням розсіювальної площадки:

$$\frac{K_e}{V_B} = \frac{94,176}{0,29} = 324,74 \text{ Вт/м}^4 \cdot \text{ср.}$$

Схема ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором наведена на рис. 2.12. Як і у попередньому випадку будемо вважати, що тіло розжарення лампи має форму кола, радіус якого $r_{\text{л}} = 2,585 \cdot 10^{-3}$ м. Якщо збільшення конденсора $\beta = -2^x$, то радіус вторинного випромінювача дорівнюватиме

$$r_{\text{вт}} = 2^x \cdot r_{\text{л}} = 2 \cdot 2,585 \cdot 10^{-3} = 5,171 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

а площа –

$$A_{\text{вт}} = \pi \cdot r_{\text{вт}}^2 = 3,14 \cdot (5,171 \cdot 10^{-3})^2 = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

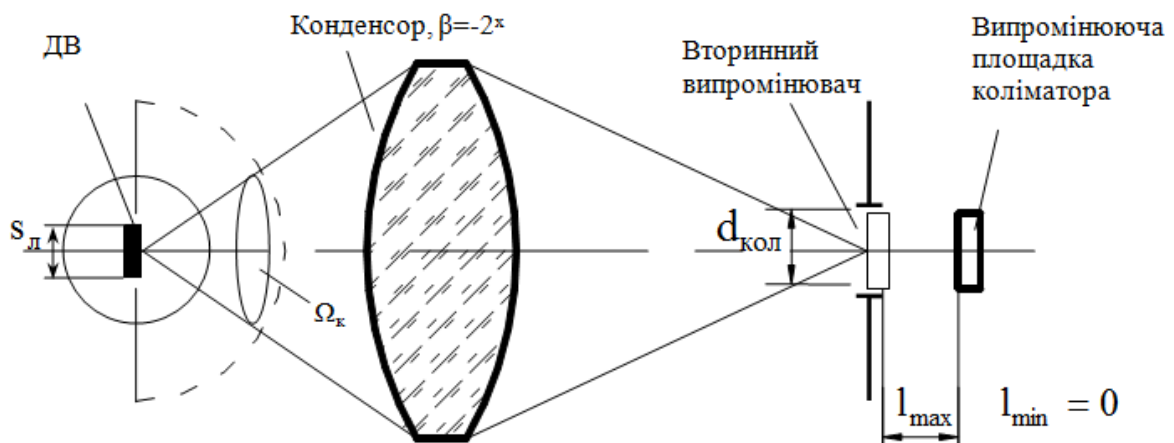


Рисунок 2.12 - Схема ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів та з конденсором

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

Для визначення світлосили такої системи необхідно обчислити її втрати. Тілесний кут, у якому поширюється сприйманий конденсором потік випромінювання дорівнює:

$$\Omega_{\kappa} = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{D_{\kappa}}{2 \cdot f'_{\kappa}} \right) \right) = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{1}{2 \cdot 1} \right) \right) = 0,6633 \text{ ср.}$$

Втрати в конденсорній системі через неузгодженість кута випромінювання галогенної лампи й кута охоплення конденсора

$$\tau_{\kappa} = \frac{\Omega_{\kappa}}{4\pi} = \frac{0,6633}{4 \cdot 3,14} = 0,053.$$

Потік, який поступає у площину вторинного випромінювача через конденсор: $\Phi_{\kappa} = \Phi_B \cdot \tau_{\kappa} = 130 \cdot 0,053 = 6,862 \text{ Вт.}$

Яскравість вторинного випромінювача:

$$L_{\text{вт}} = \frac{\Phi_{\kappa}}{\pi \cdot A_{\text{вт}}} = \frac{6,862}{3,14 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5}} = 2,6 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}.$$

Розглянемо два випадки:

а) випромінююча площадка коліматора перебуває на відстані, меншій 10 розмірів вторинного випромінювача, тоді яскравість у центрі випромінюючої площадки коліматора обчислюється по формулі (2.16):

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot r_{\text{вт}}^2}{l^2 + r_{\text{вт}}^2}, \text{ де } 0 < l < 20 \cdot r_{\text{вт}}.$$

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора дорівнює:

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l_{\text{min}} = 0) = \frac{2,6 \cdot 10^4 \cdot (5,171 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{0 + (5,171 \cdot 10^{-3})^2} = 1,3 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

б) випромінююча площадка коліматора вилучена на велику відстань, і світне вторинне джерело можна вважати крапковим джерелом

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

випромінювання, тоді:

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot r_{\text{вт}}^2}{l^2}, \text{ де } l > 20 \cdot r_{\text{вт}}.$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\min} = \frac{L_{\text{кол}}^{\max}}{10^5} = \frac{1,3 \cdot 10^4}{10^5} = 0,13 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при

$$l_{\max} = l(L_{\text{кол}}^{\min}) = \sqrt{\frac{L_{\text{вт}} \cdot r_{\text{вт}}^2 \cdot \tau}{L_{\text{кол}}^{\min}}} = \sqrt{\frac{2,6 \cdot 10^4 \cdot (5,171 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{0,13}} = 1,635 \text{ м.}$$

Дана схема дає дещо меншу яскравість випромінюючої площадки коліматора, ніж попередня, але має менші габарити. Важливим також є вибір матеріалу для конденсора, оскільки він повинен бути неселективним у спектральній зоні, вказаній у вихідних умовах.

Логічно припустити, що, оскільки збільшення конденсора дорівнює $\beta = -2^x$, то лінійна зона розподілу яскравості по перетину вторинного випромінювача буде вдвічі більше від попереднього випадку для критичного випадку, коли відстань мінімальна ($l_{\min} = 0$):

$$\Delta r_{\text{лін}}(l_{\min}) = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Інші умови приймемо такими ж як у попередньому пункті, тобто розміри умовного об'єму: $h \times s \times l_{\max} = 0,34 \text{ м} \times 0,34 \text{ м} \times 1,635 \text{ м}$.

Тоді енергетичний фактор має значення:

$$K_e = \Delta r_{\text{лін}}(l_{\min}) \cdot L_{\text{кол}}(l_{\min}) = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 10^4 = 46,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{ср}}.$$

Умовний фактор, за яким можна оцінити габарити установки:

$$V_b = h \cdot s \cdot l_{\max} = 0,34^2 \cdot 1,635 = 0,189 \text{ м}^3.$$

Габаритно-енергетичний фактор:

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

$$\frac{K_e}{V_b} = \frac{46,8}{0,189} = 247,61 \quad \text{Вт/м}^4 \cdot \text{ср.}$$

Схема ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней та сіткою дещо подібна до двох, наведених раніше (рис. 2.13).

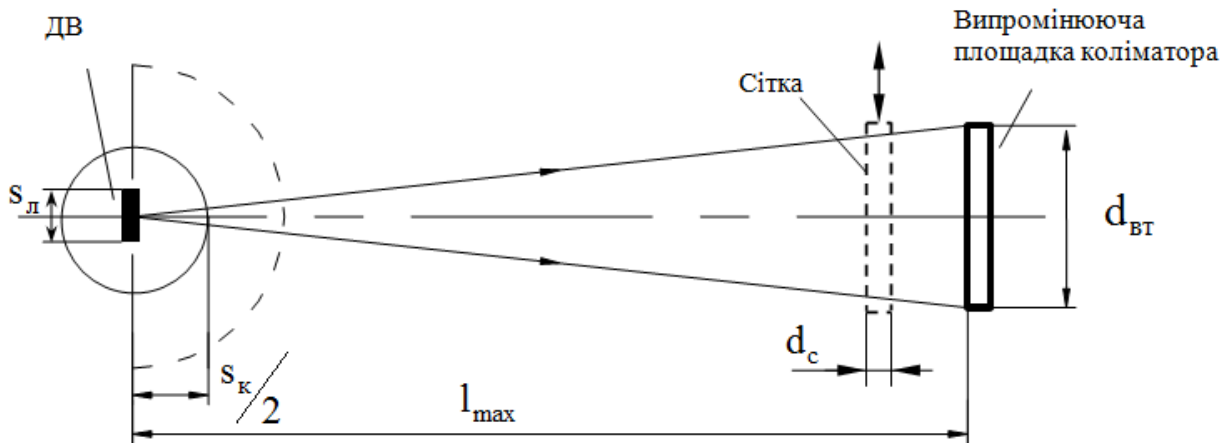


Рисунок 2.13 - Схема ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней та сіткою

Очевидно, що виводячи сітку зі схеми, отримуємо варіант побудови каліброваного ослаблювача з безпосереднім опроміненням площадки за законом зворотних квадратів. Тому максимальне значення яскравості у центі випромінюючої площадки коліматора буде досягнуте при виведенні сітки з ходу променів і обчислюється за формулою (2.16), а отже дорівнює раніше розрахованому рівню при вже використовуваних значеннях еквівалентного радіусу лампи випромінювання $r_l = 2,585 \cdot 10^{-3}$, м та її яскравості $L_l = 9,852 \cdot 10^5, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$:

$$\begin{aligned} L_{\text{кол}}^{\text{max}} &= \frac{L_l \cdot r_l^2 \cdot \tau}{l^2 + r_l^2} = L_{\text{кол}}(l_{\text{min}}) = \\ &= \frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{(7,5 \cdot 10^{-3})^2 + (2,585 \cdot 10^{-3})^2} = 5,232 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}. \end{aligned}$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС

При введенні сітки в схему між первинним ДВ та розсіювальною пластинкою коліматора досягається додаткове зменшення яскравості вторинного випромінювача, що в свою чергу дозволяє отримати потрібне зменшення яскравості на меншій відстані, ніж у схемі з безпосереднім опроміненням випромінюючої пластинки коліматора.

Будемо вважати, сітка завжди розташована так, що весь потік, який потрапляє на випромінюючу площадку коліматора, проходить через неї. Як і раніше вважаємо, що випромінююча та опромінювана поверхні є круглими.

Аналогічно до попередніх схем розглядаємо два випадки при введенні сітки в хід променів:

а) розсіювальний екран, який є випромінюючою площадкою коліматора розташований близько до первинного джерела. Найменша відстань, на якій може розташовуватися розсіювальний екран коліматора відносно тіла розжарення лампи, дорівнює:

$$l_{\min}' = \frac{s_{\text{л}}}{2} + d_{\text{с}} = 7,5 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для розрахунку яскравості випромінюючої площадки коліматора використовуємо формулу (2.16):

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{л}} \cdot \tau_{\text{с}} \cdot \tau \cdot r_{\text{л}}^2}{l^2 + r_{\text{л}}^2}, \text{ де } l_{\min}' < l < 20 \cdot r_{\text{л}}.$$

Максимальне значення яскравості випромінюючої площадки коліматора при введенні сітки:

$$\begin{aligned} L_{\text{кол}}^{\max}' &= L_{\text{кол}}(l_{\min}' = 8,5 \cdot 10^{-3}) = \frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{(8,5 \cdot 10^{-3})^2 + (2,585 \cdot 10^{-3})^2} = \\ &= 2,086 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}. \end{aligned}$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\min} = \frac{L_{\text{кол}}^{\max}}{10^5} = \frac{5,232 \cdot 10^4}{10^5} = 0,523 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при

використанні сітки на відстані:

$$l_{\max} = l(L_{\text{кол}}^{\min}) = \sqrt{\frac{L_{\text{л}} \cdot r_{\text{л}}^2 \cdot \tau \cdot \tau_{\text{с}}}{L_{\text{кол}}^{\min}}} = \sqrt{\frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,523}} = 1,774 \text{ м.}$$

Лінійна зона випромінюючої площадки дорівнює $\Delta r_{\text{лін}}(l_{\min}) = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На великій відстані випромінюючої площадки коліматора від тіла розжарення лампи розподіл яскравості по перетину вторинного випромінювача досить рівномірний (внаслідок додаткового розсіювання сіткою), тому лінійною зоною можна вважати всю пластинку.

Дана схема подібна до двох попередніх, додаткові елементи малогабаритні, тому вважаємо розміри для установки для обчислення об'єму такими ж: $h \times s \times l_{\max} = 0,34 \text{ м} \times 0,34 \text{ м} \times 1,774 \text{ м}$.

Енергетичний фактор:

$$K_{\text{е}} = \Delta r_{\text{лін}}(l_{\min}) \cdot L_{\text{кол}}(l_{\min}) = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 5,232 \cdot 10^4 = 94,176 \text{ Вт/м} \cdot \text{ср.}$$

Умовний фактор, за яким можна оцінити габарити установки:

$$V_{\text{в}} = h \cdot s \cdot l_{\max} = 0,34^2 \cdot 1,774 = 0,116 \text{ м}^3.$$

Габаритно-енергетичний фактор:

$$\frac{K_{\text{е}}}{V_{\text{в}}} = \frac{94,176}{0,116} = 814,67 \text{ Вт/м}^4 \cdot \text{ср.}$$

Як і можна було передбачити, схема з сіткою у якості додаткового ослаблювача з коефіцієнтом пропускання $\tau_{\text{с}} = 0,5$ забезпечує вдвічі зменшує яскравість випромінюючої площадки коліматора. Габарити методу є досить великими, але менші від схеми з безпосереднім освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

квадратів відстаней. Відстань, на яку переміщується розсіювальна пластинка, порівняна зі схемою з конденсором. Дана схема потребує більш детального дослідження.

Схема ослаблювача на законі Малюса наведена на рис. 2.14. Аналогічно до попередньої схеми збільшення оптичної системи з двох лінз приймається рівним $\beta=2^x$. Тоді радіус вторинного випромінювача і його площа дорівнюватимуть $r_{вт} = 5,171 \cdot 10^{-3}$ м, $A_{вт} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ відповідно.

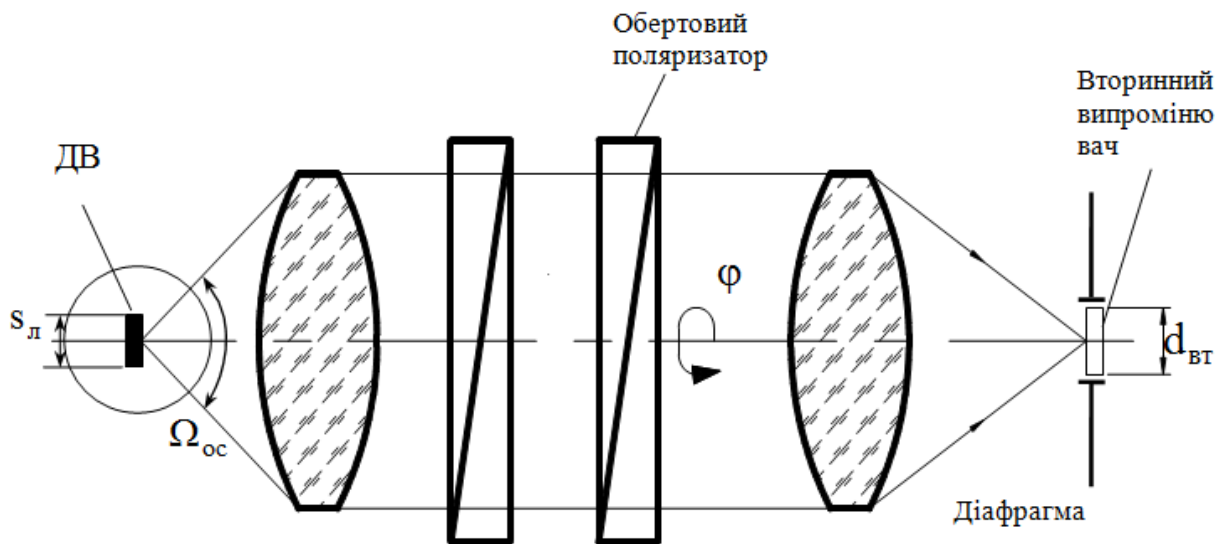


Рисунок 2.14 - Схема ослаблювача на законі Малюса

Відносний отвір першої лінзи приймемо рівним $\frac{D_{ос}}{f'} = \frac{1}{1}$, тоді тілесний кут, у якому поширюється потік випромінювання, що надходить до ОС:

$$\Omega_{ос} = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{D_{ос}}{2 \cdot f'} \right) \right) = 0,663 \text{ ср}.$$

Втрати в ОС через неузгодженість кута випромінювання галогенної лампи й кута охоплення ОС: $\tau_{ос} = \frac{\Omega_{ос}}{4\pi} = 0,053$.

Потік, що надходить у площину вторинного випромінювача через конденсор: $\Phi_{ос} = \Phi_{л} \cdot \tau_{ос} \cdot \tau_{п} \cdot \tau_{п} = 130 \cdot 0,053 \cdot 0,1 \cdot 0,1 = 0,069 \text{ Вт}$, де $\tau_{п} = 0,1$ –

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

пропускання поляризаційної пластинки.

При обертанні одного з поляризаторів яскравість вторинного випромінювача буде змінюватися по наступній залежності:

$$L_{\text{вт}}(\phi) = \frac{\Phi_{\text{ос}} \cdot \tau}{\pi \cdot A_{\text{вт}}} \cdot \cos^2(\phi) \frac{Вт}{\text{ср} \cdot \text{м}^2},$$

де ϕ – кут між площинами поляризації першої та другої пластинок. За останньою формулою побудований графік (рис. 2.15).

Максимальне значення яскравості вторинного джерела випромінювання буде досягатися, коли площини поляризації першої та другої пластинок збігаються:

$$L_{\text{вт}}^{\text{max}} = L_{\text{вт}}(\phi = 0) = \frac{\Phi_{\text{ос}} \cdot \tau}{\pi \cdot A_{\text{вт}}} = \frac{0,069 \cdot 0,5}{3,14 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5}} = 130,019 \frac{Вт}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}.$$

Яскравість вторинного випромінювача досягає мінімального значення

$$L_{\text{вт}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{вт}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{130}{10^5} = 1,3 \cdot 10^{-3} \frac{Вт}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \text{ при куті}$$

$$\phi = \arccos\left(\sqrt{\frac{\pi \cdot A_{\text{вт}} \cdot L_{\text{вт}}^{\text{min}}}{\Phi_{\text{ос}} \cdot \tau}}\right) = \arccos\left(\sqrt{\frac{3,14 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{0,069 \cdot 0,5}}\right) = 1,5676 \text{ рад.}$$

Оскільки збільшення конденсора дорівнює $\beta = 2^x$, то лінійна зона розподілу яскравості по перетину вторинного випромінювача буде вдвічі більше від випадку з безпосереднім опроміненням розсіювальної площадки коліматора для критичного випадку, коли пропускання максимальне (площини поляризації обох поляризаторів співпадають):

$$\Delta r_{\text{лін}}(\phi = 0) = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

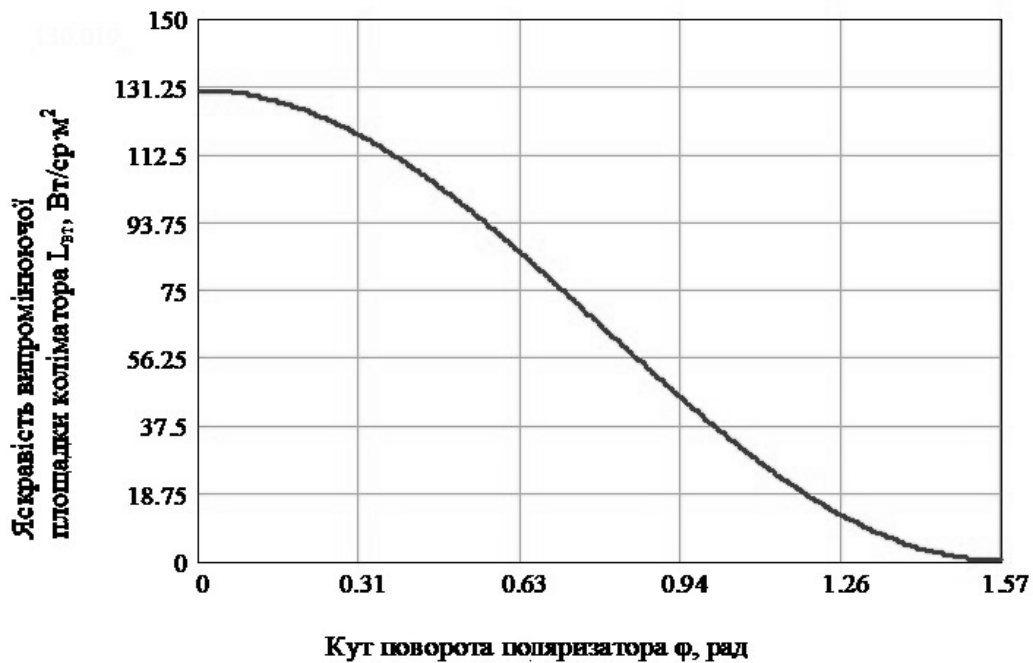


Рисунок 2.15 - Яскравість випромінюючої площадки коліматора у схемі з обертовим поляризатором

Висота оптичної лави та рейтера приймаються $h_{o.l} = 0,09\text{м}$ і $h_p = 0,15\text{м}$. Висоту самої установки приймемо рівною $h_y = 0,15\text{м}$, а довжину установки $l_y = 0,5\text{м}$. Сумарна висота буде дорівнювати:

$$h = h_{o.l} + h_p + h_y = 0,09 + 0,15 + 0,15 = 0,39\text{м}$$

Нехай ширина також дорівнює висоті: $h = s = 0,39\text{м}$.

Тоді енергетичний фактор:

$$K_e = \Delta r_{\text{лін}}(\phi = 0) \cdot L_{\text{кол}}(\phi = 0) = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 130,019 = 0,468 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{ср}.$$

Умовний фактор, за яким можна оцінити габарити установки:

$$V_B = h \cdot s \cdot l_y = 0,39^2 \cdot 0,5 = 0,076\text{м}^3$$

Габаритно-енергетичний фактор:

$$\frac{K_e}{V_B} = \frac{0,468}{0,076} = 6,15 \text{ Вт/м}^4 \cdot \text{ср}.$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС

Перевагами такої схеми є її малогабаритність та відсутність рухомих елементів. Але наявні й суттєві недоліки такої схеми: значно нижчий рівень максимальної яскравості випромінюючої площадки коліматора та різко виражена спектральна селективність.

Схема ослаблювача, побудованого на інтегруючій сфері та законі зворотних квадратів прийнята до уваги, оскільки вона має ряд переваг. Досить великий розмір вихідної зіниці інтегруючої сфери дозволяє створити на випромінюючій площадці коліматора більш рівномірний розподіл освітленості, ніж у схемі з безпосереднім освітленням за законом зворотних квадратів. За рахунок інтегрування всередині кулі у вихідній зіниці формується досить рівномірний розподіл яскравості, але можливий спектральний перерозподіл при використанні селективного покриття для внутрішньої поверхні. Але як було домовлено раніше для порівняльного аналізу потенційних можливостей схем, коефіцієнт відбиття внутрішніх стінок сфери вважається неселективним: $\rho=0,95$ у всьому спектральному діапазоні.

Для обліку впливу отвору, що вирізує на поверхні сфери колба джерела випромінювання, і вихідної зіниці сфери на сумарну освітленість у вихідній зіниці розрахуємо ефективну площу кулі, що розсіює випромінювання:

площа кульового сегмента, що опирається на площадку колби [44]:

$$A_{\kappa} = 2\pi \cdot R_{\text{сф}} \cdot R_{\text{сф}} - R_{\text{сф}} \cos \left(\arcsin \left(\frac{S_{\kappa}}{2 \cdot R_{\text{сф}}} \right) \right) = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (2.17)$$

площа кульового сегмента, що опирається на вихідну зіницю:

$$A_z = 2\pi \cdot R_{\text{сф}} \cdot \left[R_{\text{сф}} - R_{\text{сф}} \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_z}{R_{\text{сф}}} \right) \right) \right] = 1,995 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (2.18)$$

Відносна ефективна випромінююча площа кулі дорівнює:

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

$$A_{\text{еф}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2 - A_{\text{к}} - A_{\text{з}}}{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 - 1,77 \cdot 10^{-4} - 1,995 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2} = 0,983$$

Сумарна освітленість вихідної зіниці інтегруючої сфери (вторинного випромінювача) дорівнює [29]:

$$E_{\Sigma} = \frac{\rho \cdot \Phi_{\text{в}}}{4\pi \cdot R_{\text{сф}}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{\text{еф}}} = \frac{0,95 \cdot 130}{4\pi \cdot 0,1^2} \cdot \frac{1}{1 - 0,95 \cdot 0,983} = 1,48 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (2.19)$$

Яскравість вторинного випромінювача:

$$L_{\text{ем}} = \frac{E_{\Sigma}}{\pi} = \frac{1,48 \cdot 10^4}{3,14} = 4,71 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ср}}.$$

Площа вторинної випромінюючої площадки (вихідної зіниці):

$$A_{\text{вт}} = \pi \cdot R_{\text{з}}^2 = 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Яскравість центральної точки випромінюючої площадки коліматора, що перебуває на відстані, меншій 10 розмірів світної вихідної зіниці круглої форми, обчислюється за формулою, аналогічною до формули (2.16):

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot R_{\text{з}}^2}{(l^2 + R_{\text{з}}^2)}, \text{ де } l=0 \text{ м} \dots 0,5 \text{ м}.$$

Графік, побудований за останньою формулою, представлений на рис. 2.16, а.

Яскравість випромінюючої площадки коліматора, що перебуває на відстані, при якій вторинне джерело випромінювання можна вважати вже точковим, визначається по формулі: $L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot A_{\text{вт}}}{\pi \cdot l^2}$, де $l > 0,5 \text{ м}$.

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора спостерігається у випадку, коли розсіювальна пластинка (випромінююча площадка коліматора) розташована безпосередньо у вихідній зіниці сфери і дорівнює:

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l=0) = \frac{4,71 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 0,025^2}{0 + 0,025^2} = 2,355 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення: $L_{\text{кол}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{кол}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{2,355 \cdot 10^3}{10^5} = 0,0236 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при відстані між випромінюючою площадкою коліматора й вихідною зіницею сфери, рівній:

$$l_{\text{max}} = l(L_{\text{кол}}^{\text{min}}) = \sqrt{\frac{L_{\text{вт}} \cdot R_3^2 \cdot \tau}{L_{\text{кол}}^{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{4,71 \cdot 10^3 \cdot (0,025)^2 \cdot 0,5}{0,0236}} = 7,906 \text{ м.}$$

Оцінимо габарити даної установки:

$$\text{висота } h = h_{\text{ол}} + h_p + 2 \cdot R_{\text{сф}} = 0,09 + 0,15 + 0,2 = 0,44 \text{ м};$$

$$\text{ширина } s = 2 \cdot R_{\text{сф}} = 0,2 \text{ м};$$

$$\text{довжина } l_y = l_{\text{max}} + 2 \cdot R_{\text{сф}} = 7,906 + 0,2 = 8,106 \text{ м.}$$

Лінійною зоною будемо вважати всю вихідну зіницю сфери $\Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{min}} = 0) = 2 \cdot R_3 = 0,05 \text{ м}$, оскільки доведено теоретичними та практичними дослідженнями, що відхилення яскравості у вихідній зіниці інтегруючої кулі лежать в межах 2%.

Отже, енергетичний фактор має значення:

$$K_e = \Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{min}} = 0) \cdot L_{\text{кол}}(l_{\text{min}} = 0) = 0,05 \cdot 2,355 \cdot 10^3 = 117,75 \text{ Вт/м} \cdot \text{ср.}$$

Ймовірний об'єм установки:

$$V_b = h \cdot s \cdot l_y = 0,44 \cdot 0,2 \cdot 8,106 = 0,713 \text{ м}^3.$$

Габаритно-енергетичний фактор:

$$\frac{K_e}{V_b} = \frac{117,75}{0,713} = 165,15 \text{ Вт/м}^4 \cdot \text{ср.}$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС

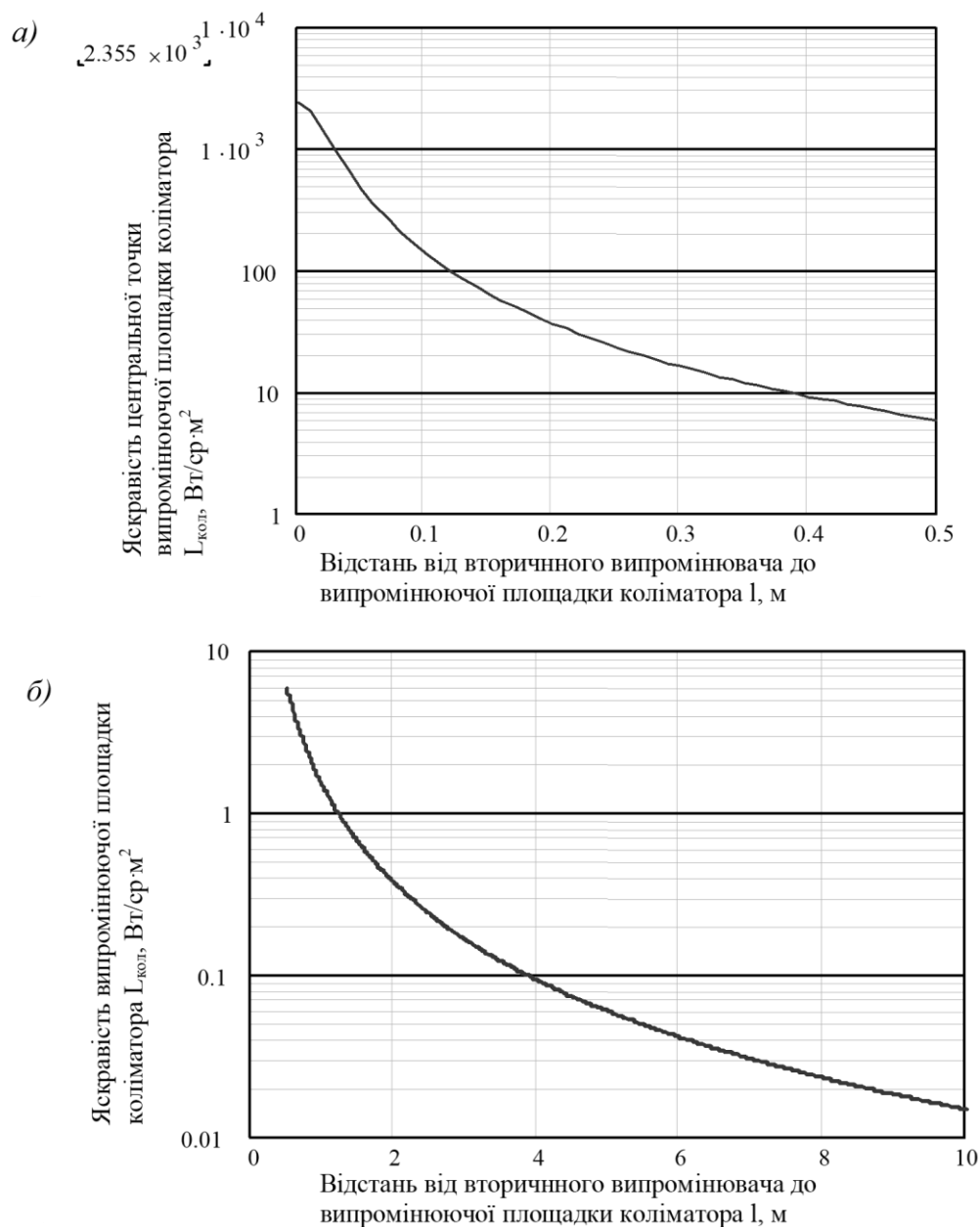


Рисунок 2.16 - Яскравість випромінюючої площадки коліматора у схемі з інтегруючою сферою та розсіювальною пластинкою: а – для неточкового джерела, б – для віддаленого (точкового) джерела

На підставі наведених розрахунків можна сказати, що така схема є досить енергетично потужною, але також має великі габарити.

Схема ослаблювача, побудованого на комбінації двох сфер і набору каліброваних діафрагм є однією з найбільш перспективних для застосування у метрологічній установці енергетичної атестації БК ОЕСС. У

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

даній схемі випромінюваний джерелом потік двічі усереднюється за рахунок інтегрування двома сферами. Яскравість вихідної зіниці другої кулі можна змінювати за допомогою варіювання площею діафрагми, через яку випромінювання з першої сфери поступає у другу, тобто на законі адитивності.

У даній схемі параметром, залежно від якого змінюється яскравість випромінюючої площадки коліматора (якою являється вихідна зіниця другої сфери), є площа вихідної зіниці першої сфери A_d . Очевидно, що A_d може змінюватися від 0 до R_3 . Вихідна зіниця першої сфери є вторинним джерелом випромінювання для другої інтегруючої сфери. У вихідній зіниці першої інтегруючої сфери буде створюватися сумарна освітленість, яка розраховується аналогічно до попереднього пункту за формулою (2.19) і при тих самих вихідних умовах чисельно дорівнює вказаній величині:

$$E_{\Sigma} = 1,48 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Яскравість вихідної зіниці другої сфери:

$$L_{\text{вих}}(A_d) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\rho \cdot E_{\Sigma} \cdot A_d}{4\pi \cdot R_{\text{сф}}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{\text{д.сф}}^{\text{д.сф}}}, \quad (2.20)$$

$$\text{де } A_{\text{д.сф}}^{\text{д.сф}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2 - 2 \cdot A_3}{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 - 2 \cdot 1,995 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2} = 0,968 \text{ — відносна}$$

ефективна випромінююча площа другої сфери.

Яскравість вихідної зіниці другої сфери буде мати максимальне значення при максимально можливому радіусі вторинного випромінювача (вихідної зіниці першої сфери):

$$\begin{aligned} L_{\text{вих}}^{\text{max}} &= \frac{\rho \cdot E_{\Sigma} \cdot R_3^2}{4\pi \cdot R_{\text{сф}}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{\text{д.сф}}^{\text{д.сф}}} = \\ &= \frac{0,95 \cdot 1,48 \cdot 10^4 \cdot 0,025^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2} \cdot \frac{1}{1 - 0,95 \cdot 0,968} = 870,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів
вимірювання ФПС БК ОЕСС

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення $L_{\text{вих}}^{\min} = \frac{L_{\text{вих}}^{\max}}{10^5} = \frac{870.6}{10^5} = 8.7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при площі вторинного випромінювача

$$A_{\text{д}}^{\min} = \frac{4\pi^2 \cdot R_{\text{сф}}^2 \cdot (1 - \rho \cdot A_{\text{сф}}^{\text{д.сф}}) \cdot L_{\text{вих}}^{\min}}{\rho \cdot E_{\Sigma}} =$$
$$\frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,1^2 \cdot (1 - 0,95 \cdot 0,968) \cdot 8,7 \cdot 10^{-3}}{0,95 \cdot 1,48 \cdot 10^4} = 0,963 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$$

Очевидно, що залежність яскравості випромінюючої площадки коліматора від площі діафрагми між першою та другою сферами є прямолінійною – одна з переваг такої схеми. Інша перевага – невеликі габарити. Але існують і недоліки. Видно, що така система дає значно нижчий рівень яскравості випромінюючої площадки коліматора, але цей недолік можна компенсувати використанням декількох ДВ.

Знайдемо енергетичний, габаритний та енергетично-габаритний фактори для даної схеми побудови інтегрального випромінювача з каліброваною яскравістю. Як і у попередній схемі з однією фотометричною кулею та рухомою розсіювальною пластинкою лінійною зоною поля яскравості вважаємо всю вихідну зіницю другої кулі: $\Delta r_{\text{лін}} = 2 \cdot R_3 = 0,05 \text{ м}$. У даній схемі необхідно певним методом реалізувати зміну діаметру отвору між першою та другою сферами. В залежності від методу реалізації будуть залежати габаритні розміри установки. Але, оскільки даний параграф передбачає тільки первинне порівняння, а не детальне дослідження, то задаємося розмірами самостійно, виходячи з їх реалістичності і можливості практичного втілення. Прийнемо габаритні розміри наступними:

висота $h = 0,5 \text{ м}$;

ширина $s = 0,4 \text{ м}$;

довжина $l_y = 0,4 \text{ м}$.

2.1.1.4 Порівняльний розрахунок схемотехнічних рішень засобів вимірювання ФПС БК ОЕСС

Тоді енергетичний фактор має значення:

$$K_e = \Delta r_{\text{лин}}(l_{\text{min}}) \cdot L_{\text{кол}}(A_o^{\text{max}}) = 0,05 \cdot 870,6 = 43,53 \text{ Вт/м} \cdot \text{ср.}$$

Ймовірний об'єм установки:

$$V_B = h \cdot s \cdot l_y = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 0,4 = 0,08 \text{ м}^3.$$

Габаритно-енергетичний фактор:

$$\frac{K_e}{V_B} = \frac{43,53}{0,08} = 544,125 \text{ Вт/м}^4 \cdot \text{ср.}$$

2.1.2 Вимірювання зонної характеристики

Основною проблемою вимірювання зонної характеристики є створення дифузного випромінювача (ДВ) з нерівномірністю поля яскравості менше (3 – 5) %, розмірами в 1,2...1,3 рази більшими розміру поля зору БК ОЕСС і високою енергетичною яскравістю (орієнтовно 20 Вт/ср·м² ... 100 Вт/ср·м²).

У відомих системах атестації БК ОЕСС ця задача розв'язується двома способами – за допомогою розсіюючого екрану або інтегруючої сфери (фотометричної кулі) з отвором, що перевищує розмір вхідної зіниці ОЕСС [31]. Переваги розсіюючого екрану – відносно невеликі габарити і простота. Наприклад, описана в [31] панель мала розміри 1 м² x 0,5 м². Проте, для калібрування такого екрану потрібна прецизійна фотометрія з точно відомим полем зору, а для забезпечення необхідної енергетичної яскравості потрібно використовувати потужні дугові лампи.

Інтегруюча сфера забезпечує кращі метрологічні характеристики – перш за все більш рівномірний розподіл променистості у вихідній зіниці. Отримати аналітичну залежність розподілу яскравості від параметрів сфери дуже складно. Але практика показала, що цей параметр тим краще, чим

2.1.2 Вимірювання зонної характеристики

більше діаметр сфери і менше відношення розміру вихідної зіниці до цього діаметра. В таблиці 2.4 приведені характеристики різних дифузних випромінювачів з інтегруючою сферою [26, 37]. Можна помітити, що відношення $D_{вх}/D_{сф} = 1/4 \dots 1/6$ є цілком прийнятним як з метрологічною, так і з енергетичної точок зору.

Таблиця 2.4 Основні характеристики дифузних випромінювачів

Вимірювальна установка	Діаметр сфери $D_{сф}$, м	Діаметр вихідної зіниці $D_{вх}$, м	$D_{вх}/D_{сф}$	Нерівномірність яскравості у вихідній зіниці не більше %
Jena-Optronic (ФРН)	2	0,8	0,4	4
ТМ (США)	1,22	0,41	0,336	0,5
NEC Corporation (США)	1	0,28	0,28	0,3
Камелія (Росія)	1	0,28	0,28	0,5

Розрахунок СЩЕЯ ДВ також зустрічає ряд труднощів. Відомий вираз для розрахунку яскравості вихідної зіниці фотометричної кулі:

$$L_{зр.вх} = \frac{\Phi_u}{4\pi^2 R_{сф}^2} \frac{1}{1 - \rho \left(\frac{A_{сф} - A_{отв}}{A_{сф}} \right)}, \quad (2.22)$$

де $A_{сф}$ і $A_{отв}$ – площа внутрішньої поверхні сфери і сумарна площа отворів відповідно.

Коефіцієнт віддзеркалення стінок ρ тільки в першому наближенні може вважатися неселективним. Аналітичного виразу функція $\rho(\lambda)$ звичайно не має і її розрахунок достатньо складний. Більш того, як показано

2.1.2 Вимірювання зонної характеристики

в [29], додатковий внесок в селективність ДВ вносить поглинання середовища, що заповнює сферу, особливо при великих $D_{\text{сф}}$.

2.1.3 Вимірювання спектральної характеристики

Вимірювання відносної спектральної характеристики БК ОЕСС може проводитися по стандартній методиці [24] з використанням неселективної фотометрії порівняння. Основними проблемами є забезпечення достатньо високої монохроматизації зондуючого випромінювання і малої похибки (менше 3 %) при значному рівні сигналу на приймачі ОЕСС.

Для діапазону 0,4 мкм ... 1,8 мкм в спектральному випромінювачі можуть використовуватися подвійні монохроматори МДР-41, МДР-204 і МДР-206; причому дві останні моделі значно дешевше. МДР-204 забезпечує зворотну лінійну дисперсію 2,6 нм/мм, а МДР-206 – 4,3 нм/мм при відносному отворі об'єктиву 1/6 і 1/4 відповідно. Похибка установки довгі хвилі менше 0,5 нм.

З монохроматорами добре узгоджуються стрічкові лампи типу СИРШ 6-100 і СИРШ 8,5-200 з колірною температурою 2840 К і 3000 К відповідно. Як неселективні приймачі можна використовувати термоелектричні приймачі РТН-12 і РТН-20 з сапфіровими вікнами, які працюють в діапазоні 0,18 мкм – 5,5 мкм з похибкою перетворення не більше 6 %.

2.1.4 Вимірювальна установка

Враховуючи високі вимоги до точності і стабільності (повторюваності) вимірювання енергетичних характеристик БК ОЕСС, метрологічне забезпечення атестаційної установки ускладнене в умовах України недостатністю фотометричної бази відповідного рангу.

Можливі два принципово різних підходу до метрологічного забезпечення даних вимірювань – з використанням зразкового (еталонного)

2.1.4 Вимірювальна установка

джерела випромінювання або - на основі абсолютного радіометра [21, 24].

Використовування абсолютного радіометра має ряд позитивних моментів і у ряді країн цей метод знаходить застосування навіть в державних еталонах фотометричних величин [20]. Коефіцієнт перетворення такого радіометра визначається за допомогою спеціальної обмотки заміщення, омичний нагрів якої порівнюється термобатареею з оптичною потужністю, що поглинається в радіометрі. Спектральна чутливість оптичного каналу коригується спеціальними (звичайно рідинними) світлофільтрами [21]. Основними недоліками радіометрів є нееквівалентність теплових полів при радіаційному і електричному нагріві, що складно враховується, низька чутливість (0,05 В/Вт ... 1 В/Вт) і висока вартість. Окрім цього, висока точність вимірювання (похибка близько 0,3 %) забезпечується при рівнях опроміненості $800 \text{ Вт/м}^2 \dots 1400 \text{ Вт/м}^2$, тоді як в багатьох випадках ця величина істотно менше.

Більш розповсюдженим є метод атестації з використанням еталонних випромінювачів, перш за все ламп розжарювання [23, 25, 27]. Для цього можна використовувати різні випромінювачі – галогенові, стрічкові, дейтерієві. Проте, з урахуванням існуючої фотометричної бази, найдоцільнішим нам представляється застосування світловимірювальних ламп типу СИС, атестованих по СЩЕЯ. Їх перевагами є висока стабільність відтворення одиниці, довговічність, простота експлуатації, прийнятна оптична потужність. Ці випромінювачі, завдяки високим метрологічним характеристикам, використовуються в діючому еталоні кандели Росії, а також як зразкові засоби в системах перенесення одиниці еталона [24]. Крім того, при використанні світловимірювальних ламп можливе додаткове калібрування установки по силі випромінювання (з перерахунком на габаритну енергетичну яскравість). Хоча такий спосіб менш точний, його можна застосовувати для попередньої оцінки характеристик випромінювачів. Залежно від точності компаратора, похибка передачі одиниці СЩЕЯ від ламп типу СИС може складати (2...8) %, що цілком прийнятне. Наприклад похибка передачі одиниці СЩЕЯ при калібруванні

2.1.4 Вимірювальна установка

системи ТМ супутника Landsat і системи SPOT/HRV склала близько 6,8 %
.

Як вторинний еталон або зразковий випромінювач установки можна також використовувати стрічкові лампи типу СИРШ, але їх стабільність гірша, ніж у світловимірювальних ламп, а випромінювана потужність менше, що вимагає розширення динамічного діапазону компаратора і, як наслідок, приведе до зниження точності.

Враховуючи рівні калібрувальних сигналів, а також розглянуті раніше методи вимірювання енергетичних характеристик БК ОЕСС, для атестації і калібрування випромінювачів установки можна рекомендувати перевірочну схему, показану на рис. 2.17. Відповідно до неї, ДВ використовується як вторинний еталон установки. Спочатку визначається чутливість всіх пікселів ПЗЗ-лінійки за середніх умов освітленості, а потім вимірюється ФПС декількох певних пікселів у всьому динамічному діапазоні. Отримані результати з відповідними поправками інтерполюються (екстраполюються) на решту пікселів. Перенесення одиниць яскравості від ДВ до інтегрального випромінювача здійснюється, таким чином, через приймач БК ОЕСС. Аналогічно калібрується і спектральний випромінювач. Схожі методи використовуються і в деяких інших установках [29].

Запропонована схема дозволяє проводити перенесення одиниці СЩЕЯ від вторинного еталона установки до інтегрального і спектрального випромінювачів через компаратор.

Розглянута схема перенесення одиниці СЩЕЯ і метрологічні елементи, що використовуються, є попередньою і вимагає більш глибокого дослідження.

2.1.4 Вимірювальна установка

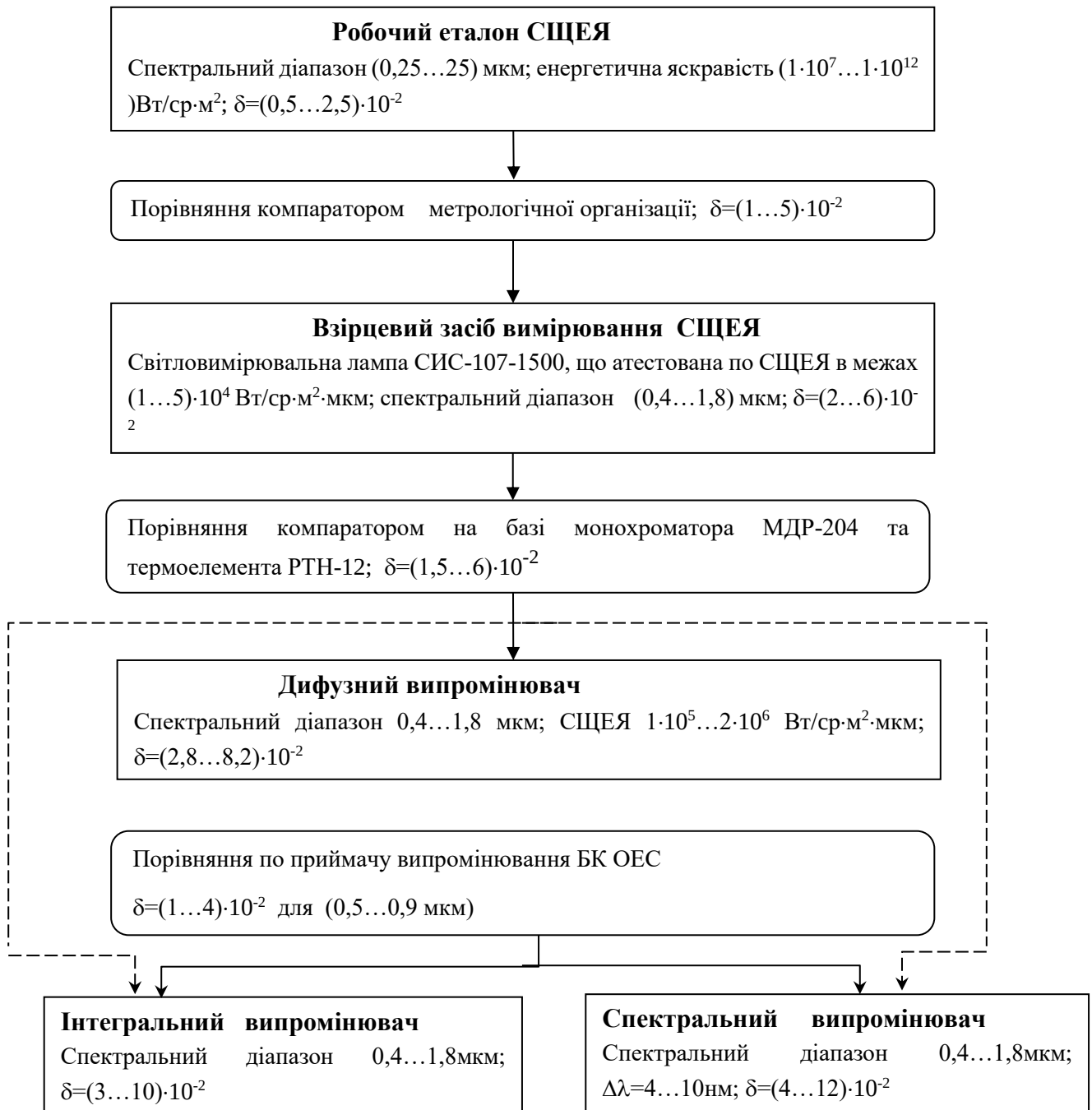


Рисунок 2.17 - Перевірочна схема для вимірювальної установки: δ - СКВ

Можлива схема установки, що реалізовує розглянуті вище методи вимірювань, показана на рис. 2.18. Її основні особливості:

- враховуючи відносно малий ресурс роботи випромінювачів, обумовлений напруженим тепловим режимом, до складу установки входить калібрувальний блок, що дозволяє проводити періодичне калібрування випромінювачів як по ДВ так і по ОВП (в схемі на

2.1.4 Вимірювальна установка

рис. 2.29 цей зв'язок позначений пунктирною лінією);

- вимірювальний і калібрувальний блоки функціонально і конструктивно з'єднані, що дозволяє зберегти метрологічну конфігурацію і параметри установки постійними, поліпшити повторюваність вимірювань;
- відсутнє переміщення основних елементів вимірювальної схеми – сполучення здійснюється через комутуюче дзеркало, що зменшує похибка геометричної прив'язки.

Режими роботи установки:

- 1) комутуюче дзеркало 9 в положенні I, плоске дзеркало 13 – в положенні I. ДВ підключений до компаратора – передача одиниці СЩЕЯ від компаратора до ДВ;
- 2) плоске дзеркало 13 в положенні II. ОВП підключений до компаратора – передача одиниці СЩЕЯ від ОВП до компаратора;
- 3) комутуюче дзеркало 9 в положенні II. ДВ підключений до сканера – вимірювання зонної характеристики;
- 4) комутуюче дзеркало 9 в положенні I, коліматорний об'єктив 7 в положенні I. ІВ підключений до БК ОЕСС – вимірювання функції передачі сигналу;

2.1.4 Вимірювальна установка

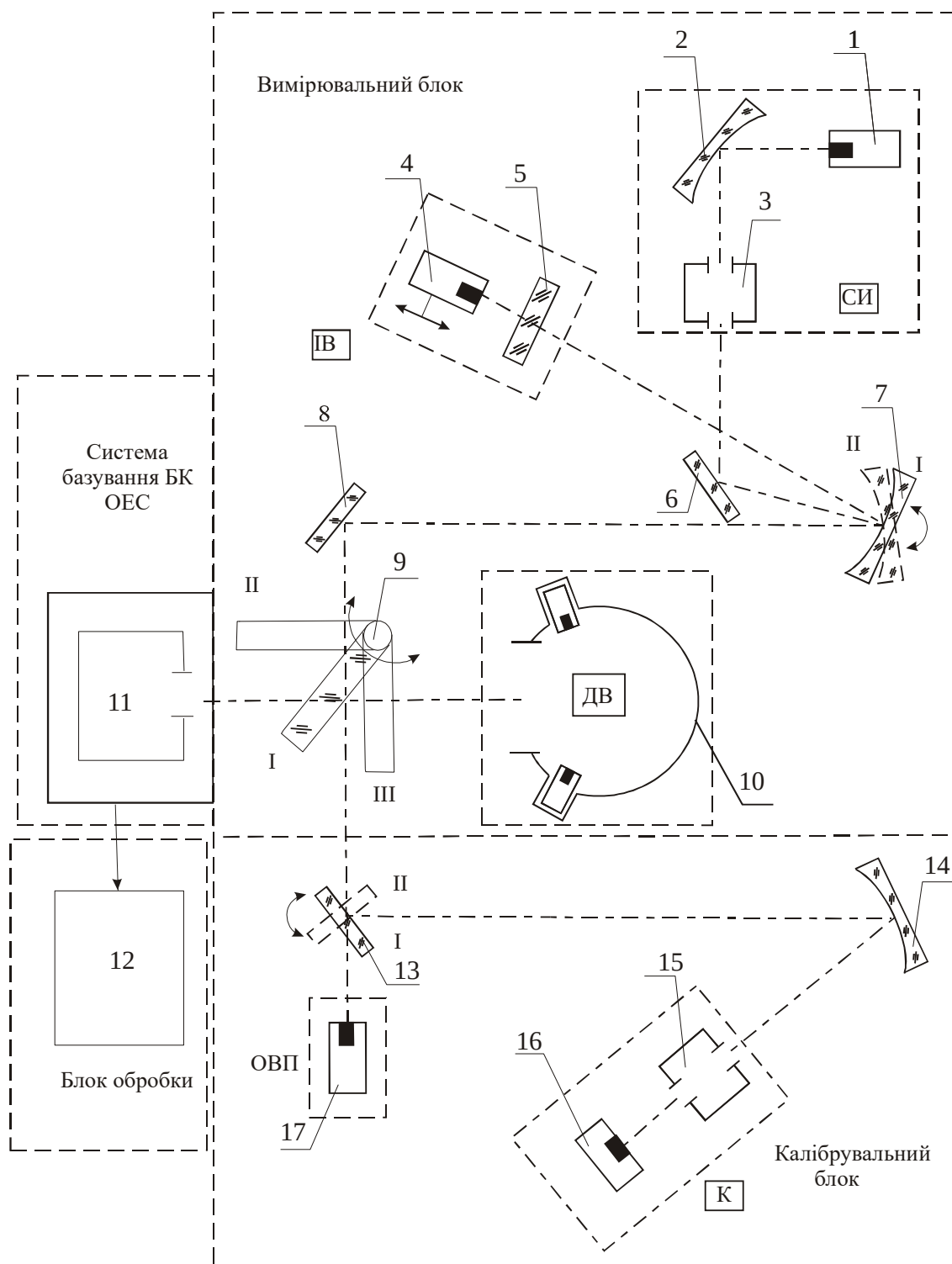


Рисунок 2.18 - Структурна схема вимірювальної установки: 1, 4, 17 – джерела випромінювання; 2 – конденсор; 3, 15 – монохроматори; 5 – розсіююча площадка; 6, 8, 13 – плоскі дзеркала; 7 – об'єктив коліматора; 9 – комутуюче дзеркало; 10 – дифузний випромінювач; 11 – БК ОЕСС; 12 – система обробки; 14 – фокусуючий об'єктив; 16 – приймач випромінювання; К – компаратор

2.1.4 Вимірювальна установка

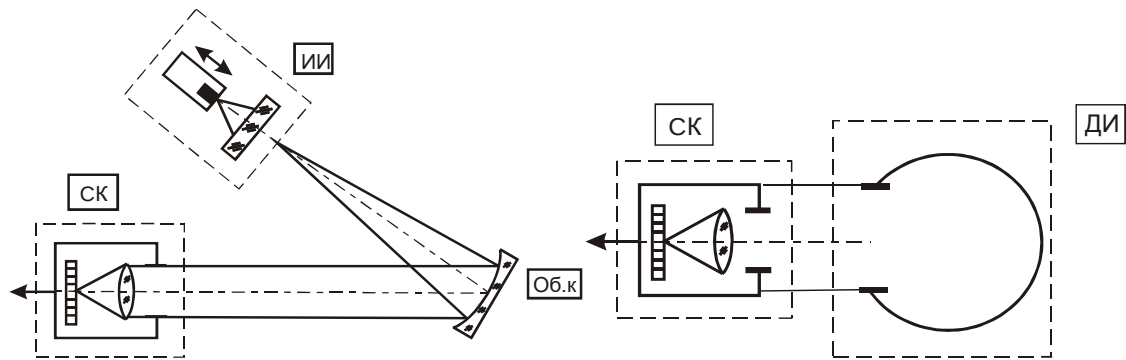
- 5) комутуюче дзеркало 9 в положенні І, коліматорний об'єктив 7 в положенні ІІ. СВ підключений до сканера – вимірювання спектральної характеристики;
- 6) комутуюче дзеркало 9 в положенні ІІІ, вимірювальний блок підключений до калібрувального. Калібрування ІВ і СВ по ОВП.

Еквівалентні вимірювальні схеми, які реалізують ці режими показані на рис. 2.19.

В установці передбачається використання фокусуємого і коліматорного об'єктивів з відносними отворами $1/6$ і $1/8$, фокусними відстанями 1,4 м і 2 м відповідно. Діаметр інтегруючої сфери (ДВ) 1 м, діаметр вихідної зіниці 0,28 м. Для живлення джерел випромінювання доцільно використовувати стабілізовані по струму блоки живлення БП-120 ВНИИОФИ (еталонний випромінювач) і МТКС-15 і МТКС-30 (ІВ і ДВ).

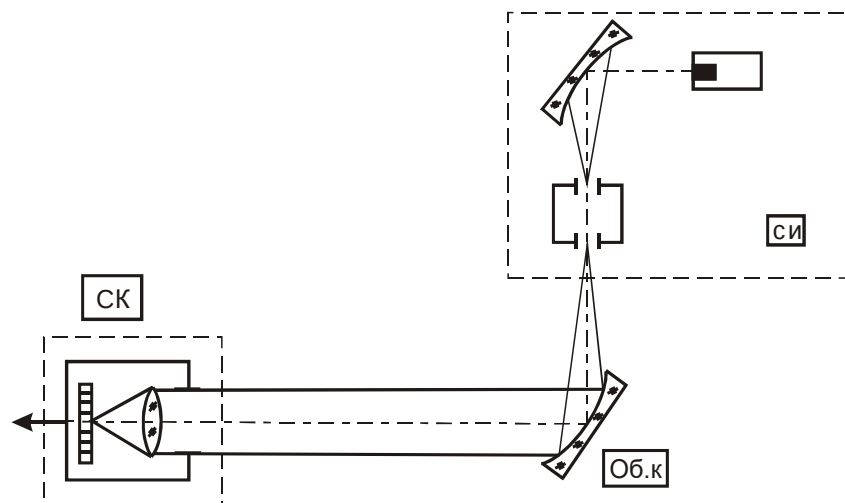
Природно, що з урахуванням комплектації і розміщення устаткування в умовах реальної лабораторії, конфігурація і склад установки будуть іншою. Зокрема, з схеми можна вивести калібрувальний блок і комутуюче дзеркало, а ДВ вводити у вимірювальний тракт переміщенням (по аналогії з установкою «Камелія»). Плоскі дзеркала, що визначають геометрію схеми, можуть розташовуватися в інших точках і їх кількість може бути іншою.

2.1.4 Вимірювальна установка

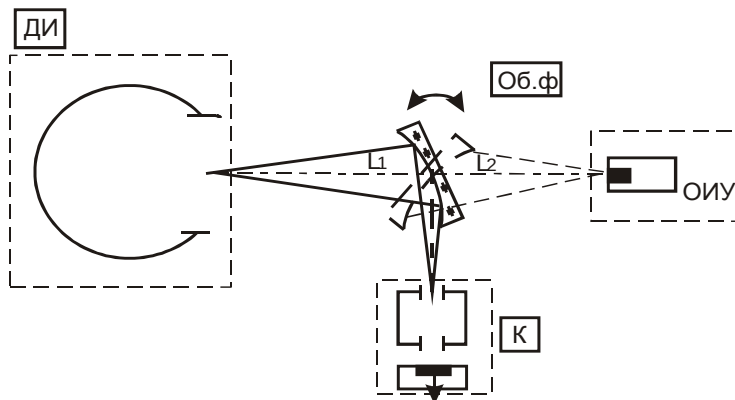


а) вимірювання ФПС

б) вимірювання зонної характеристики



в) вимірювання спектральної характеристики



г) перенесення одиниці СЩЕЯ від ОВП до ДВ

Рисунок 2.19 - Еквівалентні вимірювальні схеми: Об. к. – об'єктив коліматора; Об. ф. – об'єктив фокусуючий

2.1.5 Похибки вимірювань

Сумарна похибка вимірювання енергетичних характеристик БК ОЕСС на розглянутій установці містить помилки метрологічних засобів установки і інструментальну помилку БК ОЕСС.

З урахуванням статистичної незалежності похибок градувань випромінювачів сумарна випадкова помилка δ вимірювання характеристик може бути розрахована як:

$$\delta = k_{\beta} \sqrt{\sum \delta_i^2}, \quad (2.23)$$

де k_{β} - коефіцієнт враховує величину довірчої ймовірності ($k_{\beta} = 1,1$ при $\beta = 0,95$); δ_i - складові похибок.

Тоді окремі складові похибок можна розрахувати таким чином.

Похибка вимірювання відносної функції передачі сигналу БК ОЕСС $\delta_{\text{ФПС.о}}$:

$$\delta_{\text{ФПС.о}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_u^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (2.24)$$

де δ_u - похибка градування ОВ; δ_{θ} - геометрична похибка базування; δ_o - похибка обробки вихідного сигналу. Оцінка дає величину 2,7 %.

Похибка вимірювання функції передачі сигналу в абсолютних величинах $\delta_{\text{ФПС.а}}$:

$$\delta_{\text{ФПС.а}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{\text{ЭИ}}^2 + \delta_u^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (2.25)$$

де $\delta_{\text{ЭИ}}$ - похибка перенесення одиниці від вторинного еталона до ОВ. Оцінка $\delta_{\text{ФПС.а}}$ дає величину 7,12 %.

Похибка вимірювання відносної спектральної характеристики $\delta_{\text{с.о.}}$:

$$\delta_{\text{с.о.}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (2.26)$$

де δ_c - похибка градування СВ. Оцінка $\delta_{\text{с.о.}}$ дає величину 3,6 %.

2.1.5 Похибки вимірювань

Похибка вимірювання спектральної характеристики в абсолютних величинах $\delta_{c.a.}$:

$$\delta_{c.a.} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{EC}^2 + \delta_c^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (2.27)$$

де δ_{EC} - похибка передачі одиниці від вторинного еталона до СВ. Оцінка $\delta_{c.a.}$ дає величину 7,54 %.

Похибка вимірювання відносної зонної характеристики $\delta_{z.o.}$:

$$\delta_{z.o.} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{\theta}^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (2.28)$$

де δ_{θ} - похибка градування дифузного випромінювача. Оцінка $\delta_{z.o.}$ дає величину 1,9 %.

Наведені оцінки похибок є попередніми і відносяться до випадкової компоненти. Оцінка систематичних помилок елементів вимірювальної установки може бути виконана тільки після її остаточного складання і налаштування. Проте практика показує, що величина сумарної систематичної похибки може у декілька разів перевершувати випадкову компоненту і потрібна серйозна робота по її виключенню або мінімізації.

Визначення інструментальної похибки БК ОЕСС і похибок абсолютизації шкал яскравості вимагає додаткових досліджень. Відзначимо тільки, що джерела [26] оцінюють її в межах (2,9 ... 5,4) %, а сумарну помилку атестації БК ОЕСС (без урахування систематичних похибок) величинами порядку 7,1 % для відносних і 11,4 % - для абсолютних вимірювань. Запропонована установка, як видно з проведеного аналізу, може забезпечувати близькі результати. Але при цьому використовується більш проста і доступна елементна і метрологічна бази.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

Калібрування випромінювачів є підготовчою процедурою перед атестацією установки метрологічною службою відповідного рангу, а не замінює її.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

Слід також врахувати, що перед калібруванням випромінювачів слід виконати юстування і налаштування установки і усунути (мінімізувати) систематичні похибки елементів вимірювального тракту.

Аналіз якості юстування установки і оцінка невиключених систематичних похибок дозволяє поліпшити методику калібрування випромінювачів.

Калібрування і визначення похибок інтегрального випромінювача

Похибки вимірювання ФПС БК ОЕСС можна розділити на три групи:

- похибки, які викликані нестабільністю елементів вимірювального тракту джерела випромінювання (Δ_u), приймача випромінювання (Δ_n), оптичних елементів. А також випадковою зміною фонові ситуації під час вимірювання. Очевидно, що переважаючими похибками будуть Δ_u і Δ_n ;
- похибки відлікового пристрою ОВ (Δ_0) і похибки, які викликані випадковим відхиленням закону переміщення джерела випромінювання від заданого (Δ_s);
- похибки, які викликані переміщенням зображення випромінюючого майданчика коліматора щодо пікселя БК ОЕСС, на якому проводиться вимірювання. Ці похибки, як було раніше показано, обумовлені нерівномірністю яскравості майданчика по його перетину. Тому будь-які умови переміщення елементів вимірювального тракту (перш за все дзеркальних) приведуть до зміни вихідного сигналу. В значній мірі ця похибка виявлятиметься при переміщенні джерела випромінювання по оптичній лаві.

При визначенні елементів, що вносять найбільший внесок в загальну похибку ОВ, слід виконати окрему оцінку похибок, які вносяться кожною з перерахованих груп. Проте для оцінки сумарної похибки ОВ, необхідно побудувати вимірювальну схему так, щоб всі похибки могли проявити себе в рівній мірі і бути оціненими із загальних позицій.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

Для цього пропонується загальна схема калібрування, показана на рис. 2.20.

В її склад, окрім штатних елементів установки – ОВ, Об_к і Дз, входить імітатор БК ОЕСС, діафрагма (Об_і) з параметрами, які аналогічні параметрам штатного об'єктиву БК ОЕСС, діафрагма (D_и) з розмірами, відповідними розмірам пікселя і приймача випромінювання (ПВ_и) з лінійною світловою характеристикою. В якості такого приймача може використовуватися світлодіод ФД-25к.

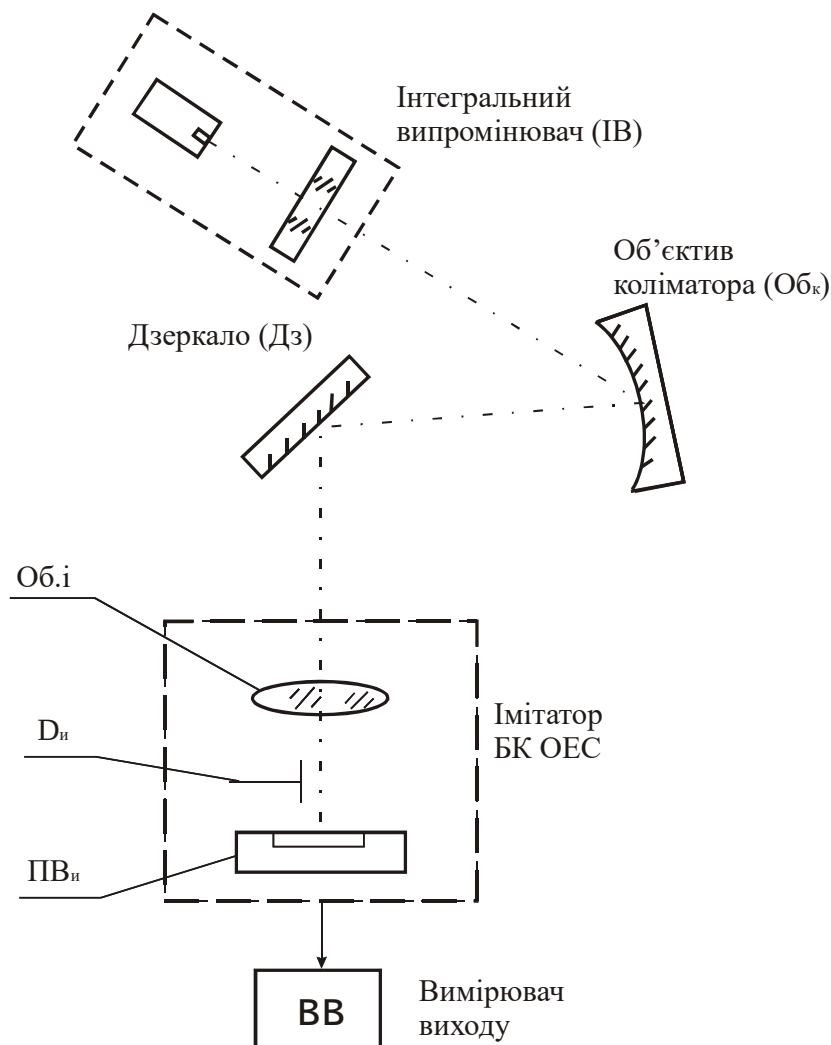


Рисунок 2.20 - Вимірювальна схема для визначення похибки інтегрального випромінювача

Імітатор встановлюється на місце БК ОЕСС і повинен мати аналогічні елементи базування. Очевидно, що в цьому випадку вихідний сигнал

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

імітатора міститиме всі перераховані похибки вимірювання ФПС.

При калібруванні ОВ кілька разів проводять вимірювання градуовальної характеристики використовуючи імітатор. При цьому через похибки вимірювального тракту одержують сімейство графіків, приблизний вид яких показаний на рис. 2.21.

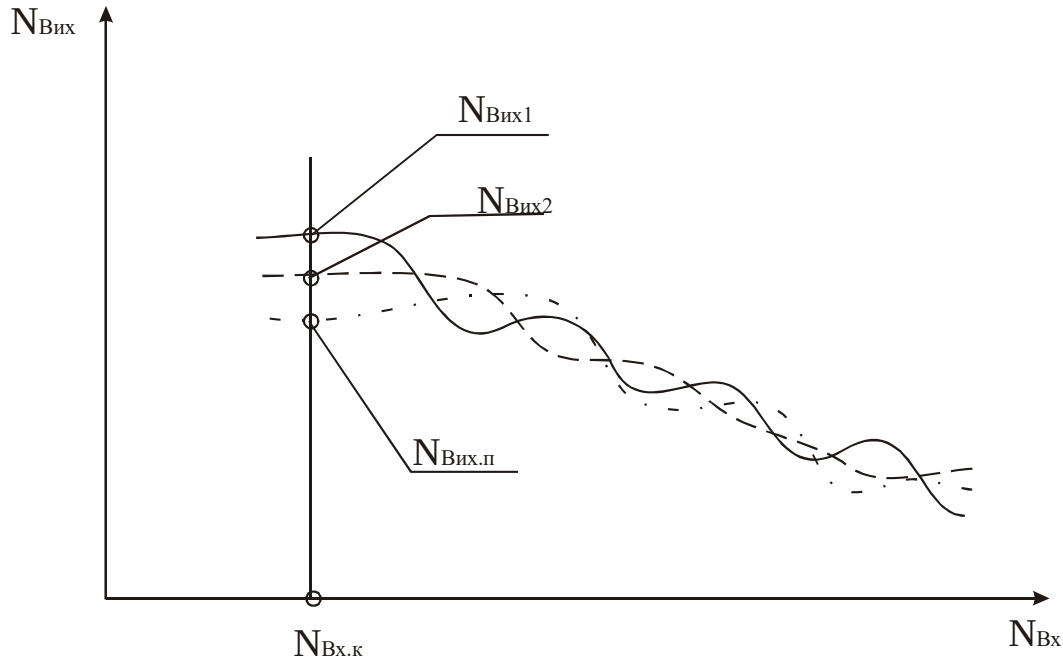


Рисунок 2.21 - До визначення похибки інтегрального випромінювача:

$N_{вх}$ – показання відлікового пристрою ОВ; $N_{вих}$ – показання вимірювального виходу імітатора БК ОЕСС

Потім, для будь-якого заданого значення $N_{вх}$ проводять оцінку середнього значення і величини довірчого інтервалу при заданій довірчій ймовірності.

Враховуючи, що градуовальна характеристика вимірюється у відносних одиницях, доцільно оцінку похибки також проводити для відносних значень вихідного сигналу.

Кількість перетинів (точок вимірювання градуовальної характеристики) встановлюється виходячи з вимог контролю БК ОЕСС.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

Калібрування і визначення похибок спектрального випромінювача

В монохроматорах застосовують два види шкал довжин хвиль: шкали, на яких нанесені безпосередньо значення встановлюваних довжин хвиль, і рівномірні шкали, що виміряють (як правило - в градусах) кут повороту ручки установки довжин хвиль.

Прилади першого типу не потребують градуювання по довжинах хвиль. Проте через невеликі механічні зсуви, точна відповідність між шкалами і істинними значеннями встановлюваних довжин хвиль може бути порушена. Перед початком роботи з приладом необхідно це перевірити і при розбіжності відновити відповідність за допомогою юстирування шкали. Для більшої надійності бажано проводити таку звірку на декількох довжинах хвиль. Для цього використовуються джерела лінійчатого спектру.

Градуювання може здійснюватися як візуально (у видимій області спектру) шляхом спостереження ліній в площині вихідної щілини через окуляр, так і фотоелектрично, коли правильна установка лінії знаходиться по максимальному значенню фотоструму. Другий спосіб точніше і після візуального градуювання, що полегшує орієнтацію в спектрі, раціонально проводити фотоелектричне. Для підвищення точності, градуювання слід вести при вузьких щілинах. Проте не слід звужувати щілину до такого ступеня, коли ширина зображення визначається, в основному, аберацією.

Практика показує, що такий метод забезпечує похибку градуювання монохроматора не більше 0,6 нм ... 0,8 нм для діапазону 200 нм ... 5000 нм. Наприклад, похибка градуювання монохроматорів МДР-204 і МДР-206 складає 0,5 нм при збіжності довжини хвилі установки 0,1 нм. Таким чином для даної задачі похибка градуювання монохроматора може бути доведена до 0,005 % і надалі не враховується.

Похибки вимірювання спектральної характеристики БК ОЕСС можна розділити на такі групи:

- похибки, що викликані тимчасовою нестабільністю джерела і

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

приймача випромінювання, а також інших елементів вимірювального тракту. Переважаючий вплив надає нестабільність випромінювача;

- похибки градуювання монохроматора і похибки установки ширини щілини. Як указувалося, похибкою градуювання можна нехтувати;
- похибки, що викликані переміщенням зображення вихідної щілини монохроматора на приймачі випромінювання. Ці похибки викликаються випадковими переміщеннями і нахилами оптичних елементів вимірювального тракту і є значними.

Сумарна похибка вимірювання спектральної характеристики виявлятиметься як відхилення вихідного сигналу при певній установці довжини хвилі монохроматора λ . Для визначення цієї похибки використовується схема і методика, аналогічна вживаним при калібруванні ІВ (рис. 2.22). В якості приймача випромінювання може використовуватися будь-який високостабільний приймач, що працює в заданому діапазоні, проте краще використовувати неселективний приймач, наприклад, термоелемент РТН-12.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

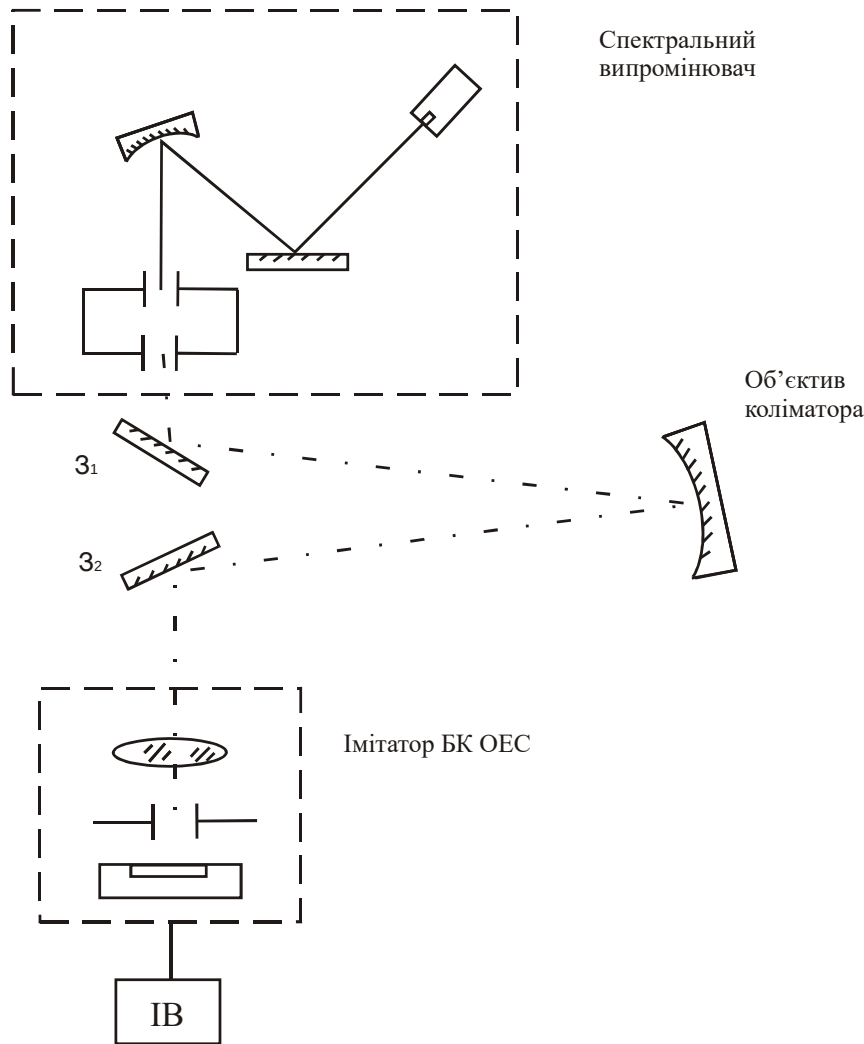


Рисунок 2.22 - Вимірювальна схема для визначення похибки спектральних вимірювань

При калібруванні СВ кілька разів проводять вимірювання відносної спектральної характеристики з використанням імітатора. По отриманому сімейству графіків для заданого значення довжини хвилі (λ_u) визначають сукупність реалізацій вихідного сигналу $N_{\text{вих}}$ (рис.2.23). Для даної сукупності визначають математичне очікування і довірчий інтервал при заданій довірчій ймовірності. Кількість реалізацій знаходять виходячи з необхідної точності. Аналогічну процедуру повторюють для іншого значення довжини хвилі.

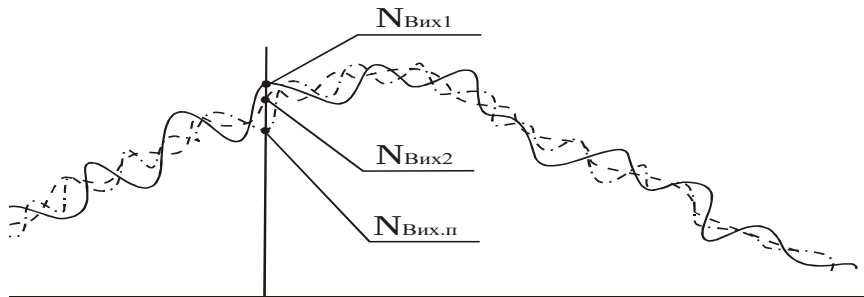


Рисунок 2.23 - До визначення похибки спектральних вимірювань

Калібрування і визначення похибок дифузного випромінювача

При вимірюванні зонної характеристики БК ОЕСС виявлятимуться такі похибки ДВ:

- нерівномірність яскравості вхідної зіниці ДВ по перетину (похибка має як систематичний так і випадковий характер);
- тимчасова нестабільність (деградація) джерел випромінювання ДВ. Ця похибка має довготривалий характер і в значній мірі залежить від типу покриття і умов експлуатації ДВ.

Звичайно при калібруванні ДВ вимірюється нерівномірність яскравості вихідної зіниці за площею, або в різних перетинах. При цьому використовуються дві схеми – з системою фіксованих діафрагм, що перекривають площу вихідної зіниці або з використанням сканування вихідної зіниці зонною діафрагмою зі встановленим за нею приймачем випромінювання.

В методі фіксованих діафрагм приймач випромінювання встановлюється послідовно в кожену діафрагму.

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

В першому методі найістотнішими будуть такі похибки:

- похибка розмірів діафрагм ;
- похибка він'єтування ІВ;
- похибки викликані нестабільністю джерел випромінювання;
- похибки дискретного розташування діафрагм;

В другому методі переважаючими будуть:

- похибки скануючого пристрою;
- похибки нестабільності джерел випромінювання ДВ.

Очевидно, що другий метод може забезпечити велику точність за умови достатньо малої похибки скануючого пристрою.

Для оцінки максимальної похибки калібрування ДВ можна використовувати різницю між максимальним і мінімальним значеннями яскравості, отриманими по відносних зонних характеристиках ДВ

$$\Delta \overset{o}{L} = \overset{o}{L}_{\max} - \overset{o}{L}_{\min} . \quad (2.29)$$

Проте ці значення самі є випадковими величинами з розкидом $\Delta \overset{o}{L}_{\max}$ і $\Delta \overset{o}{L}_{\min}$ відповідно. В цьому випадку середньоквадратичне відхилення різниці оцінюється по формулі

$$\sigma_{\Delta \overset{o}{L}} = \left| \sqrt{\sigma_{L_{\max}}^2 + \sigma_{L_{\min}}^2} \right| , \quad (2.30)$$

де $\sigma_{L_{\max}}$ і $\sigma_{L_{\min}}$ - середньоквадратичні відхилення вимірювання яскравості в двох точках вихідної зіниці.

Математичне очікування $\Delta \overset{o}{L}$ приблизно знаходиться як різниця середніх значень відносної яскравості в точках вимірювання:

$$M \left[\Delta \overset{o}{L} \right] \approx \Delta \overset{\bar{o}}{L} = \overset{\bar{o}}{L}_{\max} - \overset{\bar{o}}{L}_{\min} . \quad (2.31)$$

Тоді величина похибки вимірювання зонної характеристики ДВ

2.1.6 Калібрування випромінювачів вимірювальної установки

визначиться з виразу

$$\Delta \overset{0}{L} = \Delta \overset{\bar{0}}{L} \pm \varepsilon_{\beta}, \quad (2.32)$$

де ε_{β} визначається по обчисленому значенню і заданій довірчій ймовірності.

2.2 Принципи побудови вимірювальних засобів для оцінки якості БК ОЕСС

Основною особливістю БК ОЕСС, як засобу вимірювання, є багатократне і різноманітне перетворення інформації (рис.2.24). Вхідне двовимірне оптичне зображення перетворюється спочатку в одновимірний аналоговий сигнал, потім в закодованому вигляді передається по каналу зв'язку, після чого декодується і знову відновлюється в двовимірному оптичному вигляді. Очевидно, що методи оцінки просторово-частотних характеристик як однієї з груп показників якості і відповідна вимірювальна апаратура істотним чином залежатимуть від того, в якій точці тракту проводиться вимірювання. Проте у будь-якому випадку всі вимірювання повинні проводитися з єдиних метрологічних позицій.

На думку більшості дослідників [45 - 47], найкращі результати дають методи оцінки якості, засновані на використанні Фур'є-аналізу як оптичних систем, так і електронних компонентів. Зокрема, найбільш часто використовується функція передачі модуляції (ФПМ) і функція передачі фази (ФПФ), проте можливі і інші підходи - наприклад інформаційні [45].

Залежно від того, які елементи тракту досліджуються, можливі такі схеми побудови вимірювальних засобів (рис.2.25).

Найбільший інтерес представляє вимірювання ФПМ всього комплексу по вихідному фотодокументу (рис.2.25, г), проте при цьому важко судити про якість кожного елемента комплексу.

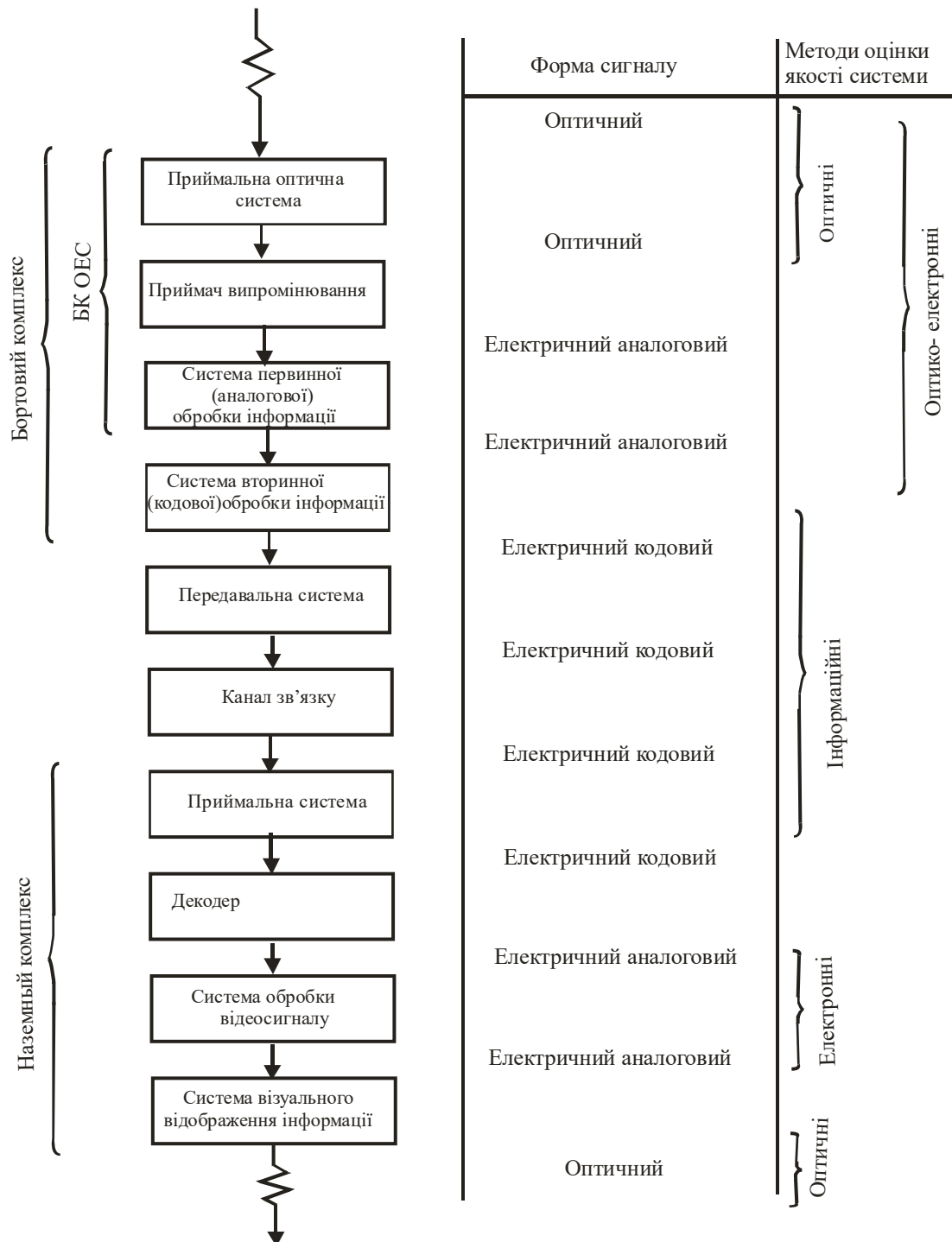
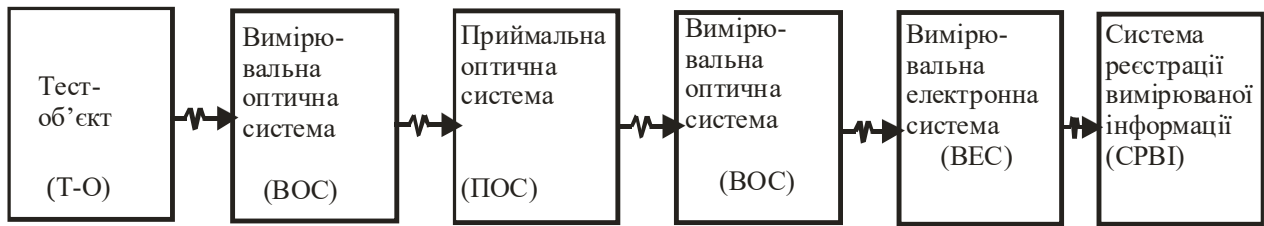


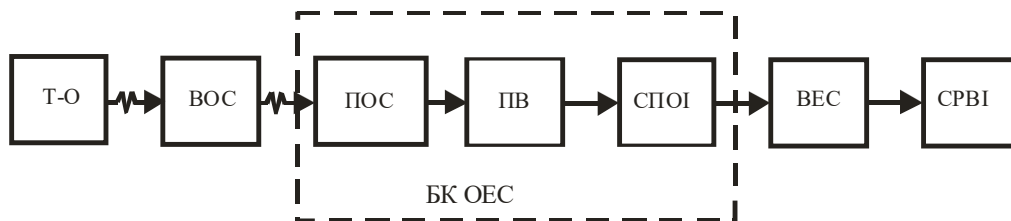
Рисунок 2.24 – Спрощена структура комплексу ДЗЗ і формати сигналів

Вимірювання характеристик тільки приймальної оптичної системи (рис.2.25, а) має обмежене використання, оскільки основні втрати інформації відбуваються саме в комплексі "оптична система – приймач випромінювання" (включаючи скануючі і аналогічні їм системи). З цієї

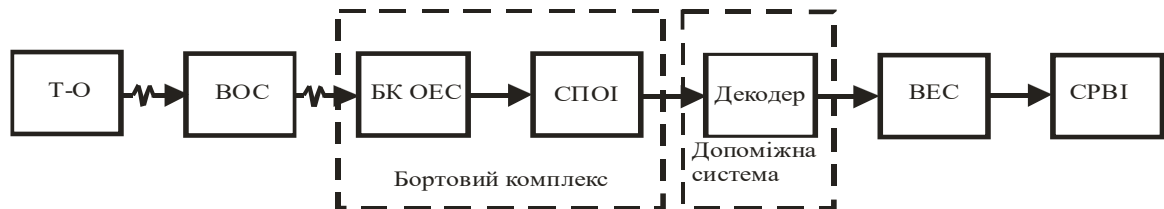
точки зору більш адекватними є схеми на рис.2.25 б, в.



а) схема контролю приймальної оптичної системи



б) схема контролю БК ОЕС на аналоговому виході



в) схема контролю бортового комплексу на кодовому виході



г) схема контролю наскрізного тракту ОЕС

↗ - оптичний зв'язок → - електричний зв'язок

Рисунок 2.25 – Структурні схеми вимірювальних стендів оцінки якості БК ОЕСС

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

Тракт проходження оптичного сигналу (починаючи від об'єкту випромінювання, середовища між об'єктом і оптичним приладом і включаючи перетворюючі сигнал елементи самого приладу аж до трансформації сигналу в зображення) можна умовно представити послідовним сполученням оптичних ланок. Кожна передавальна ланка при такому уявленні необхідна для того, щоб еквівалентно відобразити якусь певну фізичну дію на оптичний сигнал тієї або іншої ділянки тракту. Загальним для всіх цих ланок є те, що кожна з них впливає на сигнал незалежно від впливу інших елементів тракту. Таке розбиття системи на окремі ланки досить умовно і залежить від того, вплив яких чинників необхідно врахувати. При цьому враховується лише еквівалентний вплив на сигнал того або іншого чинника, незалежно від його фізичного змісту. Передавальні властивості ланки оцінюються порівнянням сигналів на її виході і вході.

В загальному випадку до сигналів, які несуть корисну інформацію, можуть додаватися сторонні сигнали, які називаються завадами. Сигнали завад поступають на вхід або вихід відповідної ланки, де вони сумуються з корисним сигналом.

Однією з характеристик передавальної ланки (рис. 2.26) є залежність амплітуди сигналу на виході ланки від її значення на вході (амплітудна або статична характеристика). Якщо амплітудна характеристика має вид $x_{c.вих} = ax_{c.вх}$, де a - постійний коефіцієнт, то вона називається лінійною.

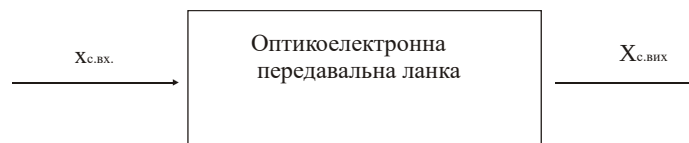


Рисунок 2.26 – Узагальнене подання оптико-електронної передавальної ланки

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

Система лінійна, якщо до неї застосовний принцип суперпозиції.

Існує кілька методів опису передавальних характеристик лінійних ланок і систем, заснованих на відгуку (реакції) ланки або системи на дію спеціального виду сигналу. Найпоширенішими передавальними характеристиками є: імпульсна функція або функція ваги - реакція на одиничний імпульс (δ -функцію), перехідна функція - реакція системи на одиничний стрибок, частотна передавальна функція - залежність амплітуди і фази синусоїдального сигналу на виході, системи від його частоти (при незмінній амплітуді і фазі на його вході). При аналізі оптичних систем цим характеристикам відповідають функція розсіювання точки і лінії, перехідна функція системи (або прикордонна крива) і комплексна оптична передаточна функція (ОПФ).

Розглянемо ці характеристики на прикладі найпростішої оптичної системи (рис. 2.27), а потім розповсюдимо їх на загальний випадок просторової передавальної ланки. Оптична система перетворює розподіл яскравості в площині об'єктів в розподіл освітленості в площині зображення. При цьому відбуваються відповідні зміни масштабу в розподілі освітленості.

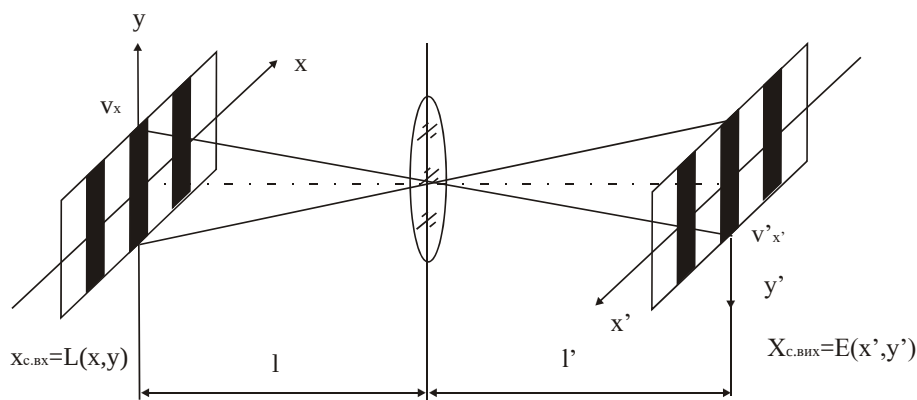


Рисунок 2.27 – Перетворення координат сигналу оптичною системою

Функція розсіювання точки або імпульсна функція характеризує реакцію оптичної системи на імпульси випромінювання, тобто на просторову δ -

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

функцію (або на точкове джерело). Реакцією оптичної системи на випромінювання точкового джерела є розподіл освітленості, створюваний нею в площині зображення цього джерела. Функція розсіювання точки визначається як відношення освітленості площини зображення до сили випромінювання I точкового джерела, що поступає на вхід оптичної системи

$$h(x, y) = \frac{E_{\delta}(x, y)}{I}, \quad (2.32)$$

де $E_{\delta}(x, y)$ — розподіл освітленості в зображенні точкового джерела.

Оскільки функцію розсіювання точки можна визначити для будь-якої точки площини зображення, то цю функцію звичайно подають в новій системі координат $h(\xi, \eta)$, де ξ і η — координатні осі, відповідно паралельні осям x і y . Проте центр системи координат ξ і η завжди суміщений з центром розсіювання в зображенні точки, який може бути розташований в будь-якій точці площини. Якщо функція розсіювання точки сама по собі симетрична, то вона виявляється симетричною щодо початку осей координат ξ і η і її можна охарактеризувати одновимірним розрізом. Приклад такого представлення симетричної функції розсіювання точки показаний на рис. 2.28.

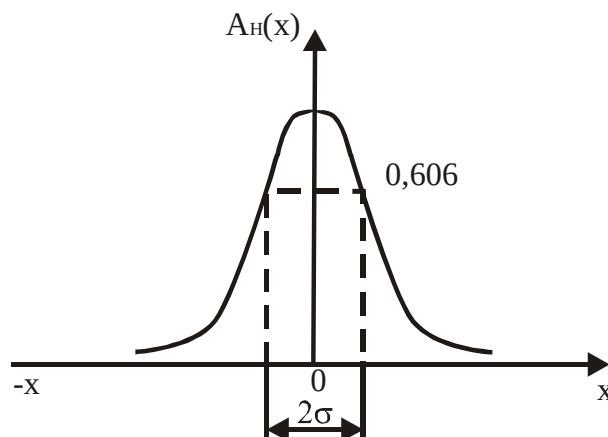


Рисунок 2.28 – Одновимірний розріз симетричної функції розсіювання точки

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

При зміні яскравості об'єкту по двох координатах освітленість, створювана оптичною системою в зображенні такого об'єкту, визначається виразом

$$E(x, y) = \iint B(x - \xi, y - \eta) h(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (2.33)$$

Цей вираз відомий під назвою інтеграла згортки. Для того, щоб користуватися виразом (2.33), необхідно перерахувати яскравість з системи координат площини об'єктів в освітленість в системі координат (x', y') площини зображення по формулах $x' = xf'/l$; $y' = yf'/l$, де f' — фокусна відстань об'єктиву; l - відстань від об'єкту до головної площини об'єктиву. При розгляді одновимірної картини розподілу освітленості в зображенні можна замість функції розсіювання точки користуватися функцією розсіювання лінії. Така функція описує розподіл освітленості в зображенні лінії, створюваною оптичною системою (рис.2.29). Функція розсіювання лінії пов'язана з функцією розсіювання точки співвідношенням

$$A(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi, \eta) d\eta. \quad (2.34)$$

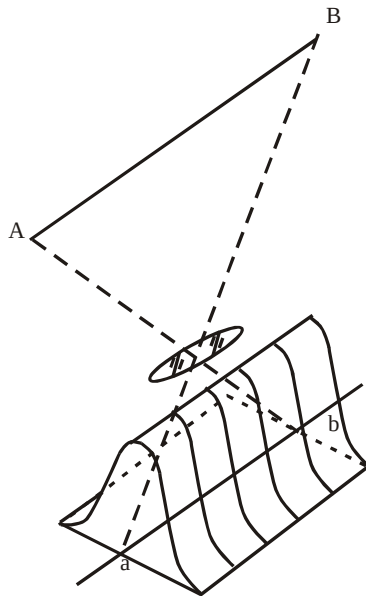
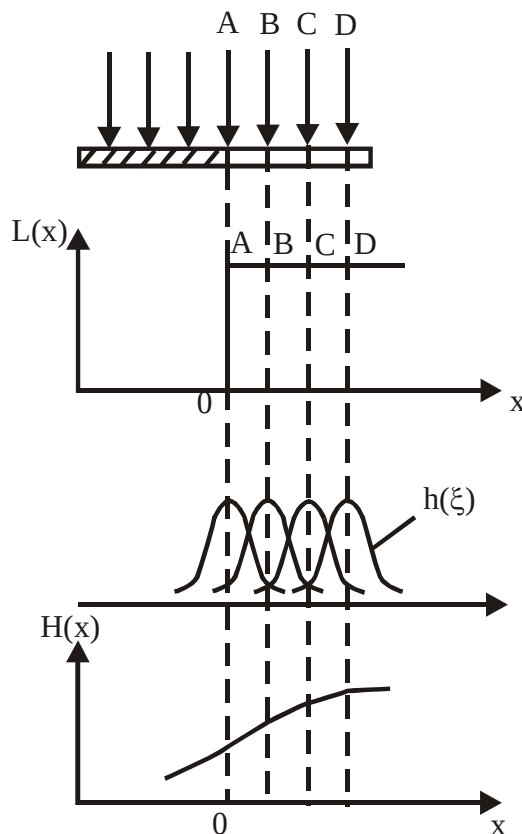


Рисунок 2.29 – Функція розсіювання лінії

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

Якщо система побудови зображення лінійна, то зображення будь-якого об'єкту можна отримати відповідним складанням функцій розсіяння всіх точок і всіх ліній об'єкта.

Перехідною функцією називається реакція системи на сигнал у вигляді одиничного стрибка. Якщо в площині об'єктів є різка межа між світлим і абсолютно темним полем, так званий "краєвий слід", то передавальна ланка залежно від своєї якості згладить цю межу, оскільки зображення точок останньої матимуть кінцеві розміри. В оптиці функцію, що описує розподіл освітленості в зображенні "краєвого сліду", називають перехідною функцією або прикордонною кривою. Оскільки у разі передачі краєвого сліду даний сигнал береться по одній координаті, то для знаходження елементарної реакції системи при передачі нею різкої межі поля випромінювання можна використовувати функцію розсіяння лінії (2.34). Побудуємо перехідну функцію (прикордонну криву) сумуванням елементарних функцій розсіяння лінії, як це показано $A(\xi)$ на рис.2.30.



2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

Рисунок 2.30 – Побудова прикордонної кривої $H(x)$ сумуванням елементарних функцій розсіяння $A(x)$

Нормований розподіл освітленості в кожній точці зображення напівплощини описується виразом

$$H(x) = \int_{-\infty}^x A(\xi) d\xi, \quad (2.35)$$

де $H(x)$ - перехідна функція (прикордонна крива) оптичної системи. З виразу (2.35) виходить, що функція розсіяння лінії є похідною від перехідної функції системи, тобто $A(x) = dH(x)/dx$ (ξ - поточне значення аргументу в системі координат, де вісь ξ співпадає з віссю координат x).

Перехідна функція (прикордонна крива) так само, як і функція розсіяння точки або лінії, повністю описує властивості двовимірних передавальних ланок. Розглянуті передавальні функції є реакцією двовимірних ланок на спеціальні просторові сигнали і характеризують передавальні властивості цих ланок в природній системі координат площини x, y . Якщо сигнали представлені у вигляді їх просторово-частотних спектрів, то передавальні властивості двовимірних ланок характеризуються їх оптичними передаточними функціями (ОПФ). Оптична передаточна функція визначається як відношення комплексного амплітудного спектру сигналу на виході ланки до комплексного спектру сигналу на його вході:

$$W(iv_x, iv_y) = \frac{b_{c.вих}(iv_x, iv_y)}{b_{c.вх}(iv_x, iv_y)}. \quad (2.36)$$

В загальному випадку комплексні спектри сигналів можна записати у вигляді

$$b_c(iv_x, iv_y) = |b_a(v_x, v_y)| e^{i\varphi_c(v_x, v_y)}, \quad (2.37)$$

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

де $|b_a(v_x, v_y)|$ - модуль комплексного спектру або амплітудний спектр сигналу; $\varphi_c(v_x, v_y)$ - фазовий спектр сигналу. Тоді по аналогії з формулою (2.36) вираз (2.37) можна представити у вигляді

$$W(iv_x, iv_y) = W(v_x, v_y) e^{i\varphi_c(v_x, v_y)}, \quad (2.38)$$

де $W(v_x, v_y)$ - модуль оптичної передаточної функції, який є просторовою амплітудно-частотною характеристикою, що визначає залежність зміни амплітуди сигналу на виході передавальної ланки від просторової частоти. Однією з характеристик процесу передачі оптичною системою просторових частот є коефіцієнт зміни амплітуди просторової синусоїди $W(v) = k_u / k_0$, де k_u і k_0 - контрасти в площині зображення і площині об'єктів відповідно. Ці контрасти визначаються виразами:

$$k_u = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad k_0 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (2.39)$$

З приведених виразів виходить, що амплітудно-частотна характеристика показує залежність коефіцієнта передачі модуляції від просторової частоти. Для цієї характеристики прийнятий термін "функція передачі модуляції" (ФПМ).

Існує однозначний зв'язок: оптична передаточна функція і функція розсіювання точки виходять один з одного прямим і зворотним Фур'є-перетворенням:

$$W(iv_x, iv_y) = \iint h(x, y) e^{-i2\pi(v_x x + v_y y)} dx dy; \quad (2.40)$$

$$h(x, y) = \iint W(iv_x, iv_y) e^{i2\pi(v_x x + v_y y)} dx dy. \quad (2.41)$$

Якщо функції $h(x, y)$ і $W(iv_x, iv_y)$ мають кругову симетрію щодо нульової точки, то можна скористатися одновимірним варіантом формул (2.40) і (2.41):

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

$$W(iv_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{-i2\pi v_x x} dx; \quad (2.42)$$

$$A(x) = \int_{-\infty}^{\infty} W(iv_x) e^{i2\pi v_x x} dx. \quad (2.43)$$

Використання функцій $A(x)$ замість $h(x, y)$ у формулах (2.42) і (2.43) є більш доцільним, оскільки методика вимірювань $A(x)$ забезпечує більш високу точність, ніж вимірювання $h(x, y)$.

Розглянемо зв'язок між функцією розсіяння ліній $A(x)$ і функцією передачі модуляції для одновимірного випадку. Для цього представимо оптичну передаточну функцію, як будь-яку комплексну величину, у вигляді суми реальної і уявної частин:

$$W(i, v_x) = W_{\cos}(v_x) + iW_{\sin}(v_x) \quad (2.44)$$

де $W_{\cos}(v_x)$, $W_{\sin}(v_x)$ - реальна і уявна частотні характеристики відповідно.

Розклавши $e^{-i2\pi v_x x}$ у виразі (3.42) по формулі Ейлера, маємо:

$$W(i, v_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cos 2\pi v_x x dx + i \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \sin 2\pi v_x x dx \quad (2.45)$$

тобто

$$W_{\cos}(v_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \cos 2\pi v_x x dx; \quad (2.46)$$

$$W_{\sin}(v_x) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \sin 2\pi v_x x dx. \quad (2.47)$$

ФПМ як модуль функції $W(iv_x)$ визначається по формулі

$$W(v_x) = \sqrt{W_{\cos}^2(v_x) + W_{\sin}^2(v_x)}. \quad (2.48)$$

Співвідношення (3.46) - (2.48) показують зв'язок між ФПМ і функцією розсіяння лінії.

Вираз для визначення одновимірної ФПМ має вигляд

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

$$\varphi(v_x) = \arctg \frac{W_{\sin}(v_x)}{W_{\cos}(v_x)}. \quad (2.49)$$

Функція передачі фази (ФПФ) показує залежність фазового зсуву просторових синусоїдальних складових від частот цих складових. ФПФ характеризує здатність двовимірної передавальної ланки зберігати координати окремих точок в зображенні відносно координат цих точок в площині об'єкту. В загальному випадку крива ФПФ може мати досить складну форму. Таким чином, ФПМ і ФПФ повністю визначають оптичну передаточну функцію, тобто передавальні властивості ланки.

При розгляді впливу ФПФ двовимірних лінійних ланок на створення зображень, необхідно мати на увазі, що неспотвореному відтворенню зображень відповідає область просторових частот, в межах якої ФПФ тотожно рівна нулю. У такому разі під відсутністю спотворень розуміється точна відповідність первинних координат об'єктів в різних точках їх зображення.

Якщо ж перед системою не ставиться задача точної передачі координат об'єктів, то при розрахунку її передавальних властивостей ФПФ можна не враховувати.

Спектр освітленості зображення $b_{uz}(iv_x, iv_y)$ знаходиться як добуток спектру яскравості об'єкту і ОПФ:

$$b_{uz}(iv_x, iv_y) = b_{об}(iv_x, iv_y) W(iv_x, iv_y). \quad (2.50)$$

Формула (2.50) справедлива для випадку, коли всі просторові частоти розглядаються в одній площині. При послідовному з'єднанні декількох передавальних ланок сигнал на їх виході визначається співвідношенням

$$b_{c.облx}(iv_x, iv_y) = b_{c.об}(iv_x, iv_y) \prod_{n=1}^{n=m} W_n(iv_x, iv_y), \quad (2.50)$$

де m - кількість послідовно сполучених ланок. Структурна схема, що реалізує формулу (2.50) зображена на рис. 2.30.

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

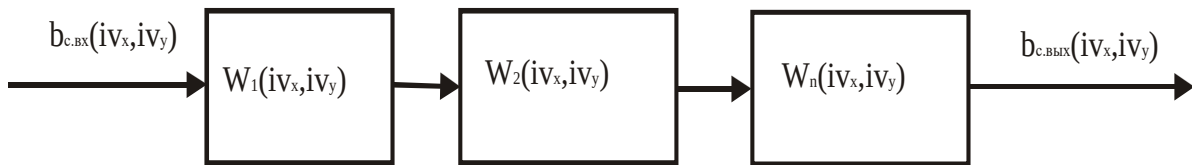


Рисунок 2.30 – Послідовне з'єднання просторово-частотних ланок

Перераховані передавальні функції (просторова імпульсна, просторова перехідна, оптична або еквівалентна їй сукупність ФПМ і ФПФ ланок систем) несуть інформацію про передавальні властивості двовимірних ланок і однозначно перераховуються одна в іншу. Доцільність вибору тієї або іншої функції для оцінки передавальних властивостей ланки залежить від умов конкретної задачі.

Всі розглянуті вирази застосовні до двовимірних систем створення зображень для випадку, коли ці системи лінійні, тобто інтенсивність освітленості в кожній точці зображення можна отримати складанням освітленостей від різних незалежних джерел. Останнє справедливо, якщо променистий потік, який переносить інформацію про зображення, створюється джерелом некогерентного випромінювання. Для випадку когерентних джерел випромінювання слід додавати не освітленості в зображенні (тобто квадратичні функції амплітуди електромагнітного коливання), а комплексні амплітуди вектора електромагнітного поля. В цьому випадку замість функцій, що характеризують яскравість і освітленість, використовуються комплексні вирази для амплітуди хвилі і комплексний коефіцієнт передачі амплітуди.

У разі некогерентного освітлення, статична ФПМ оптичної системи лінійна щодо енергії випромінювання і оптичну систему можна вважати лінійною системою. При використанні принципу суперпозиції мається на увазі, що передавальні властивості оптичної системи інваріантні щодо переміщення даної точки в площині зображення. Для реальних об'єктів ця умова не дотримується, оскільки їх передавальні властивості

2.2.1 Передавальні характеристики БК ОЕСС

змінюються при русі точки з параксимальної області до периферії поля зору, у зв'язку з чим оптичній системі властива деяка просторова нелінійність.

Таким чином, апарат частотно-передавальних функцій по відношенню до оптичної системи може бути застосовний тільки для ізопланатичних областей, в межах яких передавальні властивості оптичної системи залишаються майже незмінними.

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

В розвитку засобів вимірювання просторово-частотних характеристик оптико-електронних систем можна виділити три напрями і відповідно три етапи [48].

1. Представники першого покоління - це найпростіші засоби, створені на базі універсальної оптичної лави або окремого приладу, якість зображення якого треба досліджувати. До лави або такого приладу додаються періодичний тест-об'єкт (гратка) і аналізуючий елемент (щілина) з приймачем випромінювання позаду. Як ґратка часто використовуються елементи штрихових мір з прямокутним профілем штрихів. При скануванні зображення тест-об'єкта щілиною результат вимірювання представляється у вигляді електричного сигналу, по якому вираховується модуляція в зображенні і обчислюється ОПФ.

2. Засоби другого покоління - це частіше всього спеціалізовані прилади, створені на базі спеціальних точних оптичних лав і призначені для вимірювання ОПФ оптичних систем в широкому діапазоні їх фокусних відстаней і полів зору. В установках цього покоління періодичні ґрати тест-об'єкту або аналізатора переміщуються рівномірно або по певному закону; при цьому виконується гармонійний аналіз зображення, тобто вимірюються амплітуди і фази змінних складових електричного сигналу для різних просторових частот. Результат вимірювання – безпосередньо значення ФПМ і ФПФ.

При цьому гармонійний аналіз може бути:

- оптичним (у разі синусоїдального тест-об'єкту);
- оптико-електронним (для виділення потрібних гармонійних складових у разі прямокутного тест-об'єкту);
- електронним (при деяких спеціальних формах тест-об'єкту).

3. Засоби третього покоління також використовують сканування

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

зображення, побудованого досліджуваною оптичною системою, але на відміну від засобів першого і другого типів мають неперіодичний тест-об'єкт. Зображення некогерентно освітленого тест-об'єкту, а саме щілини або краю напівплощини, яке формується досліджуваною системою, сканується вузькою щілиною, тобто безпосередньо вимірюється функція розсіяння лінії або прикордонна крива. Отриманий сигнал обробляється за спеціальними програмами і обчислюється ОПФ, ФПМ і ФПФ. В програмах може бути врахований вплив окремих елементів вимірювального стенду (наприклад, ширини аналізуючої щілини), проведено усереднювання значень сигналу при повторному скануванні, передбачено виконання сервісних операцій.

Використання синусоїдальних тест - об'єктів дозволяє безпосередньо виміряти ОПФ і ФПМ оптичних систем, але їх виготовлення до теперішнього часу представляє значні труднощі.

Огляди деяких способів виготовлення мір з пропусканням по синусоїдальному закону приведені в роботах [50]. Коротко зупинимося на основних способах:

а) міру реєструють фотографічно при відповідній модуляції світлового потоку;

б) для виготовлення мір використовують прозорі маски синусоїдальної форми на непрозорому фоні;

в) поляризаційний спосіб: обертають один поляризатор відносно іншого, що дозволяє плавно змінювати по потрібному закону світловий потік, який діє на фотоплівку;

г) інтерференційний і близькі до нього способи: фотографічно реєструють інтерференційну або дифракційну картину у вигляді смуг з синусоїдальним законом зміни інтенсивності в кожній смузі.

Проте при реєстрації мір вказаними способами доводиться долати труднощі фотографічного характеру, які пов'язані з нелінійністю

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

фотопроцесу, оскільки на прямолінійній ділянці характеристичної кривої фотоматеріалу оптична густина почорніння D пов'язана з коефіцієнтом пропускання (прозорістю) τ проявленої фотоплівки і з експозицією H відомою залежністю

$$D = \log(1/\tau) = \gamma \log H, \quad (2.51)$$

де γ - коефіцієнт контрастності.

При фотографічній реєстрації мір повинна бути врахована форма характеристичної кривої (наприклад, можна використовувати для фотографування маски не точно синусоїдальний, а спеціально розрахований профіль) або мають бути вибрані такі умови обробки фотоматеріалу, які забезпечували б пропорційність коефіцієнта пропускання τ величині H при достатній фотографічній широті фотоматеріалу.

Вказані фотографічні труднощі практично відсутні, якщо як тест-об'єкти використовувати безпосередньо маски з вирізом синусоїдального профілю. При виготовленні таких масок фотографічним способом потрібно використовувати високо контрастний фотоматеріал, щоб отримати тільки два значення оптичної густини (найменше — для вирізу маски і найбільше — для навколишнього фону).

Використання синусоїдальних масок в установках для вимірювання ОПФ є можливим тому що ОПФ звичайно вимірюється в одному напрямі, а висоту профілю маски можна змінювати в перпендикулярному напрямі.

Вимірювання передачі модуляції або фазового зсуву для різних просторових частот вимагає або виготовлення наборів мір (з синусоїдальною зміною пропускання або з масками), або складового тест-об'єкта, з різночастотними мірами, або, тест-об'єкта з безперервною плавною зміною частоти в повздовжньому напрямку. Оскільки виготовлення синусоїдальних масок високої частоти технічно досить складно, доцільно застосовувати спосіб, по якому високочастотна частина

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

маски виходить фотографічною репродукцією низькочастотної частини.

Для того, щоб досліджувана оптична система «сприймала» тест-об'єкт як нескінченно-протяжний, довжина зображення кожної ділянки міри має істотно перевищувати ширину функції розсіяння досліджуваної системи; інакше не вдасться точно виміряти найбільший і найменший сигнали при скануванні. Як показують розрахунки, для зображення міри, сформованої безабераційною системою, результат вимірювання ФПМ перестане залежати від числа n періодів, міри вже при $n = 7$, а при $n = 5$ похибка у визначенні ФПМ не перевищує 1 % [50].

При використанні мір з плавно змінною просторовою частотою бажано для підвищення точності вимірювання по можливості змінювати частоту від одного періоду міри до наступного поступово [51].

Використання мір з прямокутним (П-образним) профілем штрихів, зважаючи на простоту їх виготовлення, доцільно для засобів вимірювання ОПФ ОЕСС. Проте використання таких мір замість синусоїдальних вимагає, або подовження процедури вимірювання ФПМ і деяких додаткових розрахунків, або зміни конструкції електронної частини вимірювального засобу.

Річ у тому, що в спектрі прямокутної міри деякої просторової частоти містяться крім гармонійної складової цієї частоти, ще і складові кратних частот, що перевищують основну в 3, 5, 7 і т.д. раз, кожна з своєю амплітудою. Ясно, що і в спектрі зображення повинні міститися ці ж гармоніки, тільки амплітуда кожної з них буде зменшена відповідно до ФПМ досліджуваної системи для кожної просторової частоти. Для об'єкту, що має вигляд

$$I(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left[\cos 2\pi N x - \frac{1}{3} \cos 2\pi (3N) x + \frac{1}{5} \cos 2\pi (5N) x - \dots \right] \quad (2.52)$$

зображення буде таким:

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

$$I'(x) = 1 + \frac{4}{\pi} \left[T(N) \cos 2\pi N x - \frac{1}{3} T(3N) \cos 2\pi (3N) x + \frac{1}{5} T(5N) \cos 2\pi (5N) x - \dots \right]. \quad (2.53)$$

При цьому передбачається, що ФПФ досліджуваної системи рівна нулю для всіх просторових частот, тобто функція розсіяння системи симетрична, як це звичайно буває для центру поля зору. Тоді всі гармоніки мають максимальні амплітуди при $x = 0$, а мінімальні при $x = 1/2N$. При цих значеннях x всі косинуси у формулі (3.23) рівні відповідно $+1$ і -1 , і:

$$\begin{aligned} I'(0) &= 1 + \frac{4}{\pi} \left[T(N) - \frac{1}{3} T(3N) + \frac{1}{5} T(5N) - \dots \right]; \\ I'\left(\frac{1}{2N}\right) &= 1 - \frac{4}{\pi} \left[T(N) - \frac{1}{3} T(3N) + \frac{1}{5} T(5N) - \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

ФПМ по прямокутній мірі, згідно формулі (2.53), має вигляд

$$\begin{aligned} T_{\Pi}(N) &= [I'(0) - I'(1/2N)] / [I'(0) + I'(1/2N)] = \\ &= \frac{4}{\pi} \left[T(N) - \frac{1}{3} T(3N) + \frac{1}{5} T(5N) - \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Використовуючи результати вимірювання ФПМ по прямокутній мірі $T_{\Pi}(N), T_{\Pi}(3N), T_{\Pi}(5N)$ для частот $N, 3N, 5N, \dots$, можна за цими даними, якщо дотримано вказану вище умову симетричності функції розсіяння системи підрахувати ФПМ по синусоїдальній мірі за допомогою формули, виведеної Колтменом [50]:

$$\begin{aligned} T(N) &= \frac{\pi}{4} \left[T_{\Pi}(N) + \frac{1}{3} T_{\Pi}(3N) - \frac{1}{5} T_{\Pi}(5N) + \frac{1}{7} T_{\Pi}(7N) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{11} T_{\Pi}(11N) + \dots + B_k \frac{1}{k} T_{\Pi}(kN) + \dots \right]. \end{aligned} \quad (2.56)$$

Таким чином, використання формули Колтмена вимагає дещо збільшеного об'єму вимірювань і визначення ФПМ для декількох додаткових значень частот, крім заданих. Звичайно можна обмежитися

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

трьома-чотирма членами формули, оскільки наступні члени входять з малими коефіцієнтами, і значення T_n в них малі.

Вимірювання з подальшим розрахунком за формулою Колтмена ускладнюються в деяких випадках електричну частину вимірювальної установки. Оскільки тест-об'єкт містить широку смугу просторових частот, то і в електричному сигналі від фотоприймача потрібно зберегти весь спектр відповідних часових частот; якщо після фотоприймача в електричну схему входить підсилювач, то він повинен бути широкопasmовим тощо.

Тому в установках для визначення ОПФ ОЕСС по тест-об'єктах з прямокутним профілем штрихів, широко використовують спосіб, що обходиться без застосування формули Колтмена і не ставить вимог до симетрії функції розсіювання [52]. Для реалізації цього способу, що полягає у фільтрації електричного сигналу від фотоприймача, вимірювальна установка повинна мати додатковий привід, що переміщає прямокутну міру. Якщо її зображення рівномірно переміщається з лінійною швидкістю v , то електричний сигнал від фотоприймача, розташованого позаду аналізуючій щілині, буде модульований з часовою частотою f (в герцах), рівною $f = Nv$, де N - просторова частота в зображенні прямокутної міри. Зсув міри $x = ut$, тобто світловий потік, діючий на фотоприймач, змінюється в часі і рівний (якщо його середнє значення прийняти за одиницю):

$$\Phi_n(t) = 1 + \frac{4}{\pi} \left[T(N) \cos 2\pi f t - \frac{1}{3} T(3N) \cos 2\pi (3f) t + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} T(5N) \cos 2\pi (5f) t - \dots \right]. \quad (2.57)$$

Отже, якщо включити в схему вузькосмуговий електричний фільтр, який пропускає часову частоту f , відповідну заданій просторовій частоті N , але зрізає вищі гармоніки ($3f, 5f$ тощо), то після фільтру виходять такі ж синусоїдальні коливання сигналу, які могли б бути отриманий від

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

синусоїдальної міри з частотою N .

За допомогою коліматорного об'єктиву при випробуваннях багатьох типів систем (фотографічних, кінознімальних, телевізійних і інших об'єктивів, а також телескопічних систем) імітується нескінченно віддалений об'єкт. В цьому випадку від кожної точки тест-об'єкту, розташованого у фокусі коліматорного об'єктиву, на досліджувану систему потрапляє паралельний пучок проміння.

Коліматорний об'єктив не тільки наближає випробування БК ОЕСС до умов її експлуатації, імітуючи хід променів з «нескінченності», але також дозволяє виготовляти або тест-об'єкт більш грубим, або щілину, більш широкою - в стільки разів, в скільки разів фокусна відстань коліматора більше фокусної відстані досліджуваної ОЕСС.

Оцінити допустиму хроматичну аберацію положення коліматорного об'єктиву порівняно просто. Це - найістотніша з його аберацій; у лінзових довгофокусних коліматорів вона досягає значних величин. Сферична аберація коліматора звичайно мала через його невисоку світлосилу, а польові аберації зовсім відсутні, оскільки тест-об'єкт займає, як правило, лише центральну частину поля зору коліматора.

Хроматизм коліматора в робочому спектральному діапазоні розглядають як подовжнє розфокусування, яке залежить від довжини хвилі, математично пов'язуючи його із спотвореннями плоского хвильового фронту, сформованого коліматором у вхідній зіниці досліджуваної системи. Скористаємося для цього відомою формулою, що зв'язує стрілку h сегменту з радіусом, рівним фокусній відстані коліматорного об'єктиву, при довжині хорди D :

$$h = \frac{(D/2)^2}{2f'_K}. \quad (2.58)$$

Продиференціювавши цю формулу, знаходимо, що подовжньому зсуву центру дуги на δf відповідає таке спотворення сферичного

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

хвильового фронту δh :

$$\delta h = \frac{(D/2)^2}{2 f_K'^2} \delta f = \frac{D^2}{8 f_K'^2} \delta f. \quad (2.59)$$

Якщо прийняти, що $\delta h = \lambda/4$, то подовжнє розфокусування має вигляд

$$\delta f = \frac{\lambda}{4} \frac{8 f_K'^2}{D^2} = \frac{\lambda}{2 [D/(2 f_K')]^2} = \frac{\lambda}{2 \sin^2 \sigma'_A}. \quad (2.60)$$

Припустимо хвильову аберацію через хроматизм положення коліматора доцільно прийняти рівній $\lambda/2$, тобто половині середньої довжини хвилі робочого спектрального діапазону. Оскільки вказане значення відноситься лише до меж діапазону, то у разі лінійної залежності хроматизму від довжини хвилі середня хвильова аберація не перевершує значення $\lambda/4$ відповідного критерію Релея, а у важливому окремому випадку, коли хроматизм коліматорного об'єктиву представлений величиною вторинного спектру, тобто коли актинічний світловий потік обмежений областю ахроматизації $\lambda_2 \lambda_3$ об'єктиву, ця аберація ще менше.

Приймаючи, як вказано вище, $\delta h = \lambda/2$ і $\delta f = \Delta$, де Δ - величина подовжньої хроматичної аберації, маємо

$$\Delta = \frac{\lambda}{[D/(2 f_K')]^2} = \frac{\lambda}{\sin^2 \sigma'_A}, \quad (2.61)$$

звідки отримаємо граничні значення характеристик коліматорного об'єктива, при яких його хроматизм не впливає на результат вимірювання ОПФ досліджуваного об'єктиву: фокусної відстані f'_K коліматорного об'єктива і відносного отвору D/f'_K . Світловий робочий діаметр D визначається не всім світловим діаметром коліматора, а меншим по величині світловим діаметром випробовуваного об'єктива:

$$f'_K = D \sqrt{\Delta/(4\lambda)}; \quad D/f'_K = \sqrt{4\lambda/\Delta}. \quad (2.62)$$

Для випадку, коли Δ - величина вторинного спектру, формула (2.62) приводиться до вигляду $f'_K = D^2 a/(4\lambda)$, оскільки вторинний спектр

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

пропорційний фокусній відстані об'єктива: $\Delta = af'_k$. Причому коефіцієнт $a = 1/400 - 1/2000$ для різних типів об'єктивів-ахроматів. Наприклад, для $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм при $a=1/1000$, виходить просте чисельне співвідношення: якнайменше допустиме $f'_k = D^2/2$, де D виражено в міліметрах.

Таким чином, якщо для вимірювання ОПФ ОЕСС з фокусною відстанню $f'_{\text{об}}$ використовуються, замість двохлінзових ахроматів коліматорні об'єктиви із зменшеним хроматизмом Δ (наприклад, лінзові апохромати або, ще краще, дзеркальні об'єктиви), то вони можуть бути більш короткофокусними, тобто відношення $f'_k/f'_{\text{об}}$ допустимо вибрати меншим.

Умова (2.62) є достатньою, але не необхідною. Вона діє навіть у тому випадку, коли випробовується безабераційний об'єктив. Оскільки реальний об'єктив може мати значну власну хвильову аберацію, не виключено, що коліматорний об'єктив збільшить її лише трохи, тобто практично не погіршить якість зображення.

До складу засобів вимірювання ФПМ ОЕСС, входять такі основні електричні і електронні вузли: джерело випромінювання, електродвигун для переміщення тест-об'єкту, фотоприймач, система обробки електричного сигналу і реєстрації результатів вимірювання, блоки живлення перерахованих електронних вузлів. Як джерела випромінювання частіше за все використовують лампи розжарювання стрічкового типу (СІ-6-100 або СІ-8-200) або кварцові галогенові лампи серії КГМ. Лампи з тілом розжарення у вигляді стрічки, рівномірної по яскравості, особливо зручні для відображення тіла розжарення конденсором безпосередньо в площину тест-об'єкту. Рівномірне переміщення останнього звичайно здійснюється синхронним електродвигуном. Фотоприймачі в сучасних установках як правило – фотодіоди. Іноді засоби комплектуються наборами змінних фотопомножувачів різної спектральної чутливості.

Електронні системи обробки сигналу і відображення виміряних

2.2.2 Аналіз засобів вимірювання просторово-частотних характеристик БК ОЕСС

значень ФПМ і ФПФ визначаються схемотехнікою конкретної вимірювальної установки.

Для стабілізованого живлення електричних вузлів використовують готові прилади, наприклад, типу МТКС-35 або СИП-30 для стрічкових ламп розжарювання (струм до (15 – 25) А), типу Б5-24А та ін. для фотопомножувачів (напруга 3000 В і більше).

Для вимірювання ФПМ зазвичай використовують змінну складову сигналу. Модуляція світлового потоку створюється періодичним тест-об'єктом або спеціальним модулятором, іноді спорядженим синхронним детектором. Частота модуляції (частота проходження імпульсів від штрихів тест-об'єкта або від модулятора) становить від десятків Гц до десятків кГц. На цю частоту налаштований наступний за попереднім підсилювачем електронний вузол - вузькосмуговий електричний фільтр. Він дозволяє поліпшити відношення "сигналу/шуму". Тут можна привести лише орієнтовні цифри, що характеризують пропускання електричного фільтра (наприклад, для $f_0 = 1000$ Гц): згасання при розбалансуванні на ± 100 Гц становить близько 20 дБ - 30 дБ; ширина смуги пропускання - близько 3% від резонансної частоти фільтра; нерівномірність амплітудно-частотної характеристики в смузі пропускання — близько 0,5 дБ. Необхідна ширина смуги визначається, головним чином, тим, наскільки змінюється частота проходження імпульсів через похибки кроку тест-об'єкта і нестабільності швидкості електродвигуна, що переміщає тест-об'єкт.

В деяких установках замість вузькосмугового фільтра (або набору фільтрів) використовують готовий прилад - аналізатор гармонік низьких частот (типу С4-44, С4-48 та ін.).

2.2.3 Оцінка точності вимірювальних засобів

Для оцінки точності вимірювань ФПМ необхідно проаналізувати можливі похибки окремих вузлів засобів і відступу від заданих умов вимірювання. Ці похибки можна розділити на систематичні і випадкові.

Поява систематичних похибок зв'язана, наприклад:

а) з використанням на установці щілин (для аналізатора або тест-об'єкта), ширина яких має певне значення;

б) з обмеженням числа штрихів періодичного тест-об'єкта [53];

3) з використанням такого тест-об'єкта, частота якого змінюється під час вимірювання ФПМ або в межах плями розсіяння [54].

Причини появи випадкових, похибок дуже різноманітні. Так, для регульованих по ширині щілин аналізатора можливі відхилення дійсної ширини щілини від вказаних на шкалі значень, а також відступи від паралельності ножів і зміни ширини щілини на різних ділянках (уздовж її довжини) [55].

Похибка вимірювання ФПМ може бути викликаною також відступом величини періоду тест-об'єкта від номінального значення, непостійністю цієї величини на різних ділянках тест-об'єкта, відступами мір або масок від синусоїдального профілю та ін. Вимірювальним установкам з скануванням зображення і вимірюванням амплітуд гармонік за допомогою електричних фільтрів має бути визначений такий допуск на розкид значень періоду тест-об'єкта, щоб виникаючі відступи часової частоти сигналу були узгоджені з шириною смуги пропускання електричних фільтрів.

При атестації засобів слід знати хвильову аберацію допоміжних оптичних компонентів (коліматора, мікрооб'єктива) для різних довжин хвиль в досліджуваному діапазоні. Сумарна хвильова аберація цих компонентів не повинна перевищувати 0,1 хвильової аберації досліджуваної системи [56].

Механічні вузли вимірювальної установки повинні задовольняти

2.2.3 Оцінка точності вимірювальних засобів

дуже серйозним вимогам, оскільки величина дефокусування, яку не можна врахувати, в площині зображення в найгіршому випадку для світлосильних короткофокусних об'єктивів з малою аберацією не повинна бути більше $\pm 0,005$ мм. З аналізу результатів вимірювання ФПМ багатьох об'єктивів виходить, що таке дефокусування приводить до зміни ФПМ на $\pm 0,01$, а не в площині найкращої установки — навіть на $0,02 - 0,05$.

При вимірюваннях ФПМ в центрі поля зору вказана величина допуску ($\pm 0,005$ мм) обмежує випадкову розбіжність (у напрямі оптичної осі) зображення і аналізуючої щілини, яка виникає як сумарна дія декількох причин: осьового биття рухомого тест-об'єкта (дисків, циліндрів) у напрямі оптичної осі, осьового биття оправы випробовуваного об'єктива при вимірюваннях в різних площинах, жорсткості кріплення вузла аналізатора, осьового биття механізму повороту аналізуючої щілини для вимірювання в меридіональному і сагітальному перетинах, похибок мікрометричного механізму подовжнього переміщення аналізуючої щілини та ін. У об'єктивів із значною аберацією глибина різкого зображення більше дифракційної, що дозволяє допустити дефокусування $\pm 0,01$ мм, а для деяких об'єктивів - і більше.

Електричні блоки живлення освітлювача тест-об'єкта, фотопомножувача, електродвигунів, електронних вузлів звичайно забезпечують стабільність напруги не гірше $0,1\%$, що приводить до відносної похибки вимірювання не більше 1% .

Електричні фільтри, як виготовлені спеціально, так і стандартні доцільно наперед забезпечити амплітудно-частотними характеристиками і порівняти їх з паспортними даними фільтрів. Форма цих характеристик дозволяє знайти, яка зміна частоти імпульсів Δf ще не викликає помітне зниження амплітуди змінної складової електричного сигналу, тобто зниження ФПМ на $0,01$ одиниці модуляції і більш.

Відношення допустимого відхилення Δf до частоти змінної складової сигналу, очевидно, визначає допуски на відносні похибки кроку

2.2.3 Оцінка точності вимірювальних засобів

тест-об'єкта або частоти обертання його електродвигуна:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta t_0}{t_0} = \frac{\Delta n_0}{n_0}.$$

Похибки у вимірюванні МПФ можуть бути викликані також нелінійністю і нестабільністю характеристик фотоприймача, підсилювачів, аналізатора гармонік.

Слід враховувати і похибки приладів електровимірювань, зокрема неточності стрілочних приладів, якщо вони використовуються.

Точність суміщення спектральної області актинічного світлового потоку вимірювального засобу із заданою областю повинна бути не гірше 20 нм - 30 нм (на рівні 0,5 від максимуму), що виходить з результатів розрахунків і вимірювань ФПМ в широкій області спектру, наприклад від 400 нм до 600 нм. Спектральне пропускання світлофільтрів - кольорових і особливо інтерференційних - має бути попередньо виміряно і порівняно з даними паспортів або каталогів.

Повинні точно виконуватися задані умови вимірювання. Доцільна гідравлічна або пневматична амортизація вимірювальної установки. Амплітуда вібрацій в площині зображення досліджуваної системи повинна бути малою в порівнянні з розмірами плями розсіяння.

Розгляд описаних вище способів оцінки похибки вимірювальних засобів, а також дані вимірювань МПФ об'єктів в різних лабораторіях [56 - 59] приводять до висновку, що вимірювання передавальних функцій оптичних систем вимагає ретельного виготовлення і підготовки (юстирування, градуювання) вимірювальних засобів і точного дотримання вказаних умов вимірювання, що стосуються вибору ряду параметрів: площини зображення, точок поля зору, досліджуваної спектральної області та ін. При виконанні цих вимог абсолютну похибка визначення ФПМ вдається зменшити до $\pm(0,03 \div 0,05)$ одиниці модуляції для центру поля і до $\pm(0,05 \div 0,10)$ одиниці модуляції по всьому полю зору досліджуваної системи.

2.2.4 Вимірювальна установка

З урахуванням проведеного аналізу для оцінки ФПМ багатоканальних ОЕСС доцільно вибрати метод, що базується на вимірюванні прикордонної кривої.

Метод має такі переваги:

- оцінка якості ОЕСС є об'єктивною, не залежною від суб'єктивних особливостей оператора;
- вимірювання проводяться без спеціальних мір. Тест-об'єкт легко реалізується в лабораторних умовах;
- енергетичні втрати у вимірювальному тракті істотно нижче, що дозволяє використовувати для вимірювання монохроматичне випромінювання, яке неважко забезпечити за допомогою монохроматора або інтерференційних світлофільтрів;
- ФПМ, що отримані по прикордонній кривій, достатньо просто перевіряються в реальних умовах при скануванні визначених зон земної поверхні (поєднання рілля – луг, берег – вода тощо).

Прикордонний градієнт - тангенс кута нахилу дотичної в середній точці прикордонної кривої до осі абсцис:

$$G_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_{\max} = \frac{\Delta E}{\Delta x'} . \quad (2.63)$$

Середній градієнт G_{cp} характеризує контраст зображення

$$G_{\text{cp}} = \frac{E_B - E_A}{x'_B - x'_A} . \quad (2.64)$$

Точки x'_A і x'_B обмежують область протяжності прикордонної кривої, яка дорівнює діаметру плями розсіяння.

Даний критерій, окрім прикордонного градієнта, враховує перепад між максимальною і мінімальною освітленостями оптичного зображення

2.2.4 Вимірювальна установка

$$P_E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{G_{\max}}. \quad (2.65)$$

P_E є сукупною характеристикою, яка враховує різкість і контраст зображення.

Найраціональнішим є використання приведених критеріїв при порівняльній оцінці двох систем - еталонної і досліджуваної. В цьому випадку критерій оцінки по прикордонній кривій легко зв'язується з іншими показниками якості. Еталонною системою може служити, наприклад, еталонний об'єктив, описаний в [59].

Вимірювання прикордонної кривої на аналоговому виході ОЕСС базується на скануванні нерухомою ПЗЗ-лінійкою зображення тест-об'єкта у вигляді краєвого сліду. При цьому ПЗЗ-лінійка (або окремий піксель) виконує роль щілинної діафрагми.

Залежно від напрямку переміщення тест-об'єкта можна вимірювати прикордонну криву по двох координатах, а при обертанні ОЕСС навколо осі, що проходить через вузлову точку приймального об'єктива - для різних кутів поля зору. Одержуваний при цьому електричний сигнал буде еквівалентний прикордонній кривій, але не тільки об'єктива, а системи "приймальний об'єктив - ПЗЗ-лінійка", і повністю характеризуватиме просторово-частотні параметри ОЕСС. По отриманій таким чином прикордонній кривій розраховується ФПМ системи.

Структурна схема установки, що реалізовує описану методику і заснована на [58], показана на рис. 2.31.

Скляний циліндр 1 обертається навкруги своєї осі електродвигуном 2, поміщеним на поворотну каретку 3 і створює краєвий слід. Конденсор 4, через поглинаючий 5 і інтерференційний 6 світлофільтри, проєктує за допомогою дзеркала джерело випромінювання 7 на робочу поверхню циліндра. Освітлена поверхня циліндра, що відіграє роль тест-об'єкту, знаходиться у фокальній площині коліматорного об'єктива 8. Поворотом каретки 3 здійснюється вимірювання як в сагітальному, так і в

2.2.4 Вимірювальна установка

меридіональному напрямку.

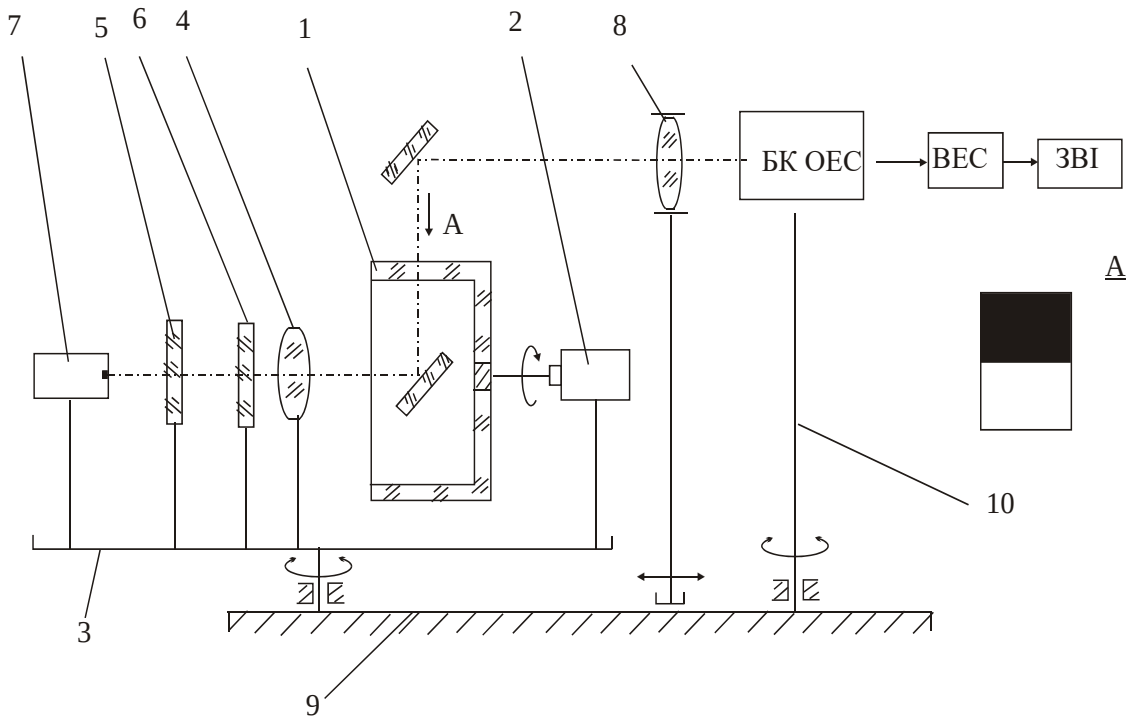


Рисунок 2.31 - Структурна схема установки для вимірювання ФПМ по прикордонній кривій ОЕСС на аналоговому вході

Поворотна каретка і ОЕСС розміщуються на масивній лаві (станині) 9, причому для вимірювання прикордонної кривої при різних кутах поля зору, ОЕСС також поміщена на поворотній платформі 10.

Як коліматорний об'єктив можна використовувати добре ахроматизовану систему з фокусною відстанню не менше 6000 мм і діаметром входної зіниці не менше 300 мм (дані уточнюються для конкретної ОЕСС). Для джерела випромінювання краще використовувати стрічкову лампу розжарювання (наприклад, СИ 6-100). Привід циліндра можна реалізувати на базі синхронного гістерезисного двигуна типу ДСП-10, що призначений для точних високостабільних механізмів.

2.2.4 Вимірювальна установка

Живлення електродвигуна, джерела випромінювання і вимірювальної електронної системи (ВЕС) повинне здійснюватись від стабілізованих джерел. Особливо високі вимоги по стабільності пред'являються до джерела випромінювання.

Вся система повинна бути надійно захищеною від стороннього випромінювання і вібрацій.

Окрім вищеописаних вузлів, установку необхідно спорядити звичайним набором юстирувальних засобів (вимірювальний мікроскоп, рухома пентапризма, автоколіматор тощо).

Для більш точних спектральних вимірювань освітлювальна система може бути виконана на базі монохроматора.

Конструктивно установка для вимірювання просторово-частотних характеристик повністю сумісна з описаною в розділі 2 установкою для вимірювання енергетичних характеристик.

Якщо досліджуваним об'єктом є ОЕСС в зборі, тобто аналізуючим елементом є безпосередньо приймач випромінювання ОЕСС, то конструкція стенду істотно спрощується. Тест-об'єктами в цьому випадку служать змінні міри з гармонійним законом розподілу оптичної густини по одній координаті. Слід відмітити, що з погляду мінімізації можливих похибок і забезпечення необхідних юстирувань перевага слід віддати першому варіанту, заклавши в конструкцію мікрометричного столу 3 можливість подовжньо-поперечного переміщення і повороту навкруги вертикальної осі. В цьому випадку конструкція стенду буде достатньо простою. Проте, в будь-яких варіантах потрібно забезпечити стабільність умов вимірювань, особливо – теплових режимів в повітряних проміжках між оптичними деталями.

Висновки

Найбільш важливими критеріями при виборі оптимальної схеми побудови каліброваного інтегрального випромінювача є максимально досяжний рівень яскравості у площині випромінюючої площадки коліматора, діапазон створюваної яскравості, рівномірний розподіл яскравості по перетину вихідної зіниці освітлювача, спектральна характеристика, а також можливість точної технічної реалізації та можливість точного градуювання самого інтегрального випромінювача.

Для більш повного урахування всіх факторів, що визначають метрологічні характеристики випромінювачів запропонований параметр K_e , який характеризує енергетичний потенціал досліджуваної схеми. Очевидно, що даний фактор необхідно максимізувати при практичній реалізації певної схеми. Для врахування габаритних параметрів випромінювачів запропоновано габаритно-енергетичний фактор $\frac{K_e}{V_B}$, який характеризує питому енергетичну потужність схеми в одиниці об'єму, що займає схема. При його розрахунку були прийняті деякі припущення про габарити схем, які потребують уточнення.

Проведений аналіз схем випромінювачів показав, що:

Схема з безпосереднім опроміненням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней забезпечує найбільшу яскравість та є найбільш простою, але має великі габарити. Важлива перевага такого інтегрального опромінювача – незначна неселективність, що визначається тільки спектральними властивостями розсіювальної пластинки.

Схема з використанням в якості додаткового ослаблювача сітки при опроміненні випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней проста в реалізації і дає високий рівень яскравості, а також є найкращою за габаритно-енергетичним критерієм.

Висновки

Схема з конденсором створює меншу максимальну яскравість, ніж дві попередні, і при цьому має майже такі ж габарити. Схема потребує коректного вибору оптичної системи, яка впливає на спектральну характеристику та якість зображення первинного ДВ.

Найгіршою є схема з поляризаційними ослаблювачами. Основними недоліками такого методу каліброваного ослаблення випромінювання інтегрального освітлювача є спектральне поглинання поляризаційними фільтрами випромінювання; нестійкість властивостей поляризаторів у часі та підвладність впливу оточуючого середовища. Слід також відмітити низький рівень створюваної яскравості вторинного випромінювача та низькі введені умовні показники K_e , V_b та $\frac{K_e}{V_b}$.

За енергетичним фактором K_e найкращою є схема, заснована на використанні фотометричних властивостей інтегруючої сфери та закону зворотних квадратів відстаней. Високий рівень K_e обумовлений великим розміром лінійної зони, а не рівнем яскравості, який є значно меншим, ніж у схемах з безпосереднім опроміненням площадки коліматора, з сітками та конденсором. Але дана схема забезпечує динамічний діапазон яскравості 105 при дуже великій відстані, на яку треба переміщувати розсіювальну пластинку коліматора відносно вихідної зіниці сфери $l_{\max} = 7,906$, тобто такий метод має великі габарити – суттєвий недолік (габаритний фактор також найбільший V_b). При практичній реалізації такої відстані переміщення можливі технологічні труднощі при виготовленні оптичної лави достатньої точності. Можливі також труднощі з розміщенням у лабораторному приміщенні. Тому в таку схему необхідно вводити додаткові ослаблювачі (наприклад, сітку) або шукати інші способи для зменшення габаритів.

Досить перспективною є схема з двома інтегруючими сферами. Але вона забезпечує відносно низький рівень яскравості у вихідній зіниці. Як вже зазначалося, даний параметр можна покращити за рахунок збільшення

Висновки

кількості первинних ДВ (галогенних ламп). Додатковою проблемою є збільшення спектрального поглинання за рахунок збільшення робочих проходів при певній селективності дифузного покриття для внутрішньої поверхні. Тобто така схема потребує більш детального вивчення з урахуванням конкретних реальних властивостей конструктивних елементів установки.

Оптимальної схеми побудови інтегрального випромінювача з каліброваною яскравістю не існує. Найбільш перспективними можна вважати схему на законі зворотних квадратів відстаней з додатковими ослаблювачами (сітками) та схему з двома інтегруючими сферами.

Виконаний аналіз методів, схем і приладів для вимірювання просторово-частотних характеристик ОЕСС показує, що:

- переважна більшість відомих методів і приладів призначена для вимірювання ФПМ оптичних систем по формованому ними зображенню. Роботи за комплексною оцінкою просторово-частотних характеристик складних ОЕСС носять, в основному, теоретичний і пошуковий характер. Прямих або близьких аналогів стендової апаратури, що розробляється, знайти не вдалося.

- до засобів вимірювання просторово-частотних характеристик ОЕСС висуваються дуже високі вимоги і їх конструювання і виготовлення можливо на добре підготовленому виробництві. Для вітчизняних реалій найбільш доцільно використовувати наявне устаткування (наприклад установки типу ЮС-105 і ЮС-153), відповідним чином його модернізувавши;

- досягнення необхідних точностних характеристик атестаційного устаткування вимагає проведення значного об'єму юстирувальних і настроювальних робіт високого рівня і з використанням відповідної апаратури.

Використання в інформаційних ОЕСС кількох спектральних каналів наразі стає основним напрямком підвищення ефективності функціонування

Висновки

цих пристроїв. Особливо помітною ця тенденція є в галузі ОЕСС для ДЗЗ з повітря і з космосу. Вибір спектральних каналів БК ОЕСС проводиться за принципом виділення діапазону роботи з максимальним значенням інформативності. Основними параметрами БК ОЕСС, що визначають інформативність оптичних зображень є просторова, енергетична та спектральна роздільні здатності. При цьому слід враховувати взаємозв'язок просторового, спектрального і енергетичного розділення, що існує в БК ОЕСС.

Перелік посилань

1. Левшин В.Л. Биокбернетические оптико-электронные устройства автоматического распознавания изображений. -М.: Машиностроение, 1987. – 145с.
2. L.A.Chan, A.Colberg, S.Der et al. MIX and match for better vision // SPIE's OE Magazine, April 2002. - P.18-20.
3. Дистанционное зондирование: количественный поход // Ш.М. Дейвис, Д.А. Ландгребе, Т.Л. Филипс и др. Под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвиса. Пер. с англ. - М.: Недра, 1983. – 196с.
4. Earth Remote Sensing System RESURS-01 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://sputnik.infospace.ru/resurs/engl/resurs.htm>. - Назва з екрана
5. Space Sensing System METEOR-3 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://sputnik.infospace.ru/resurs/engl/meteor.htm>. - Назва з екрана
6. Ocean Remote Sensing System OKEAN-01 [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://sputnik.infospace.ru/resurs/engl/ocean.htm>. - Назва з екрана
7. Колобродов В.Г., Михеенко Л.А., Микитенко В.И. Особенности измерения энергетических характеристик космических оптико-электронных сканеров // Збірка наукових праць III наук. – техн. конференції “Приладобудування 2004: стан і перспективи”. – Київ, НТУУ “КПІ”.– 2004.– С. 54 - 55.
8. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. - М.: Издательство А и Б, 1997. – 164 с.
9. Демченко Л.І., Колобродов В.Г., Руснак И. Н., Стефанович В.Т. Оптико-электронные системы с телевизионными автоматами сопровождения в системах обнаружения и прицеливания бронетанковой техники // Артиллерийское и стрелковое вооружение:

- Международ. науч.- техн. сб. – Киев: НТЦ АСВ. – 2005. – № 1. – С. 22 – 27.
10. R.R.Tenney, N.R.Sandell Detection with distributed sensors // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. – AES-17(4). -1981. – P.501-510.
 11. P.Ajjimarangsee, T.L.Huntsberger Neural network model for fusion of visible and infrared sensor outputs // Proc. SPIE. –v. 1003. - 1988. – P.153-160.
 12. R.Luo, M.Kay Data fusion and sensor integration: state of the art in the 1990s. // Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence. – Academic Press, - San Diego. -1992. – P.7-136.
 13. V.N.S. Samarasooriya, P.K.Varshney A fuzzy modelling approach to decision fusion under uncertainty // Proc. IEEE. – 1996. – P.788-795.
 14. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об'єктів // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування.- 2005. – Вип. 30. – с. 36 - 41.
 15. Гаврилюк А.І., Колобродов В.Г. Вплив типу та параметрів дисплея на ймовірність розпізнавання в оглядовій телевізійній системі // Вісник НТУУ “КПІ”. Приладобудування. – 2004. – Вип. 27. – С. 35 – 42.
 16. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. – М.: Мысль, 1986. – 179с.
 17. Демченко Л.І., Колобродов В.Г., Стефанович В.Т., Трандаш М.М. Узгодження параметрів об'єктива і приймача випромінювання в тепловізійних і телевізійних системах // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2005. – Вип. 29. – С. 43 – 48.
 18. Колобродов В.Г., Руснак І.М. Вплив розміру вибірки на формування порогів виявлення в телевізійних та тепловізійних системах автоматичного виявлення та супроводження // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування. – 2005. – Вип. 29. – С. 37 – 43.
 19. Трифонов Ю.В. Комплекс технических средств эксперимента по дистанционному зондированию Земли из космоса // Исслед. Земли из

космоса. – 1981. – №5. – С. 21 – 27.

20. Мухамедяров Р.Д., Глушков А.С. и др. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. – 1991. – №1. – С. 64 – 74.
21. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2003. - №3(29). – С. 98 – 103.
22. Кисилёв И. А., Коростелев А. Н., Караева М. К. и др. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Исслед. Земли из космоса. – 1991. – № 2. С. 34 –43.
23. ДСТУ 7678:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання спектральної густини енергетичної яскравості в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 25 мкм, спектральної густини сили випромінення та спектральної густини енергетичної освітленості в діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 2,5 мкм, потужності випромінення, сили випромінення та енергетичної освітленості в спектральних інтервалах шириною від $1 \cdot 10^{-4}$ мкм до $2 \cdot 10^{-2}$ мкм у діапазоні довжин хвиль від 0,2 мкм до 2,5 мкм; введ. 2016-01-01.-11с.
24. ГОСТ 17772 – 88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик; введ. 1989-30-06. - 64с. Скасований в Україні без заміни. Наказ від 14.12.2015 р. №188 ДП «Український науково-дослідний та навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».
25. Воронков Г. Л. Ослабители оптического излучения. – М.: Радуга. – 1976. – 216с.
26. Мешков В. В., Епанешников М. М. Осветительные установки:

Учебное пособие для вузов. – М.: Энергия.- 1972. – 203 с.

27. Новосёлов В. А., Холопов Г. К. и др. Оптические системы стенов с френелевскими ослабителями для воспроизведения значений разностей энергетических яркостей и радиационных температур // Измерит. техн. – 2000. – №1. – С. 17 – 21.
28. Золотарёв В. М., Морозов В. Н., Смирнова Е. В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. – Л.: Химия, 1984. – 325 с.
29. Гуревич М. М. Введение в фотометрию. – Л.: Энергия, 1968. – 285 с.
30. Маркелова Л. Ф. Нейтральные фильтры переменной плотности высокой точности // Информ. листок, 1973.- № 73.- С.1286.
31. Смолько Г. П., Фаерман Г. П. Сравнительный анализ фотометрических систем ослабления света // Оптико-механическая промышленность, 1978.- № 1. - С. 53 – 58.
32. Фаерман Г. П. Современные поляризационные светофильтры / Г. П. Фаерман, Д. А. Година, С. С. Савко // ОМП. – 1967. – №12. – С. 49 – 53.
33. Дадешидзе В. В., Цнобиладзе Н. А. Материалы Всесоюзн. научн.-техн. совещ. «Аналит. приборостроение. Методы и приборы для анализа жидких сред», 10 – 12 ноября 1975 г., т. I, ч. II.- С. 421.
34. Кожевников Ю. Г., Бардин Б. Н., Фотометрический ослабитель, Авт. свид. № 212572, Бюл. ОИПОТЗ, 1968, № 9.
35. Гаврик В. В. Светодозатор – технический фотометрический прибор. / В. В. Гаврик, Ю. Н. Гороховский, А. М. Фрейверх // Оптико – механическая промышленность. – 1970. - №2. – С. 25 – 29.
36. Хирд Г. Измерения лазерных параметров. – М.: Мир. – 1970. – 289 с.
37. Ищенко Е. Ф., Климков Ю. М. Оптические квантовые генераторы, М.: Советское радио.- 1968.- 351 с.

38. Кисилёв И. А., Коростелев А. Н., Караева М. К. и др. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» // Иссл лед. Земли из космоса. – 1991. – № 2.- С. 34 –43
39. Мухамедяров Р.Д., Глушков А.С. и др. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения // Исслед. Земли из космоса. – 1991. – №1. – С. 64 – 74
40. Колобродов В. Г., Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А., Петрущенко Л.А. Теорія дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2005. - №4. - С. 106 – 114.
41. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 254с.
42. De Wos J. C. A new determination of the emissivity of tungsten ribbon // Physics, 1954.- v. 20.- P. 690-714.
43. Шарловский Ю. В. Механические устройства малых оптических систем. М.: Машиностроение. – 1979. – 128 с.
44. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике. – М.: – 1978. – 336с.
45. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. М.: Радио и связь.- 1989. – 405 с.
46. Редькин С.Н., Краснов Г.А., Подкуров А.М. и др. Результаты измерения функции передачи модуляции космической ИК-аппаратуры дистанционного зондирования по выходному изображению // Оптический журнал.- 1993.- №3. – С. 44-49.
47. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение.- 1980.- 186 с.
48. Шульман М.Я., Соколова Н.Н., Васильев Ю.В. и др. Прибор для измерения частотно- контрастных характеристик объективов различного назначения // Оптико-механическая промышленность.-

1973.- №7.-С.33-36.

49. Barakat R., Lerman S. Diffraction images of truncated, one- dimensional, periodic targets. // Appl. Optics.- 1967.- v.6.- №3.- pp. 545-548.
50. Coltman J.W. The spesification of imaging properties by response to a sine-wave input. // J. Opt. Soc. America.- 1954.- v.44.- №6.- pp. 468-471.
51. Back F.G. Einfluss eines zum Zwecke der Linienfrequen-zänderung eingebauten zoom- objectivs auf die Meßyenauigkeit in Zoonar MTF-Meter. // Optik.- 1969.- v.30.- №2.- s.30-35.
52. Лихолит Н. І. Вимірювально-обчислювальний комплекс для контролю якості об'єктивів // Кравченко І. В., Кучеренко О. К., Лихолит Н. І., Овчар Т. І., Соболь В. П., Тягур В. М. - Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування. – 2003р.- Том 25.-С. 38-45.
53. Jagat Bhushan, A. K. Jaiswal. Limitations in the determination of the sine-wave response from the square-wave response // Optics Communications.- October 1974.-Volume 12.- Issue 2, pp. 181-182.
54. Marchant A.C. Accuracy in image evaluation: setting up an OTF standards laboratory. // Opt. Acta.- 1971.- v.18.- №2.-p.133.
55. British Standard BS 4779:1971. Recommendations for measurement of the optical transfer function of optical devices. Published 10.11.1971, confirmed 01.06.2016, p.22 .
56. Kuttner P. Interlaboratory comparsions of MTF measurements. // Opt. Acta.- 1975.- v.22.- №4.-p.265.
57. Rosenbahuer K., Rosenbruch K.-J. The measurement of the optical transfer functions of lenses. // Reports on progress in physics. - London, V. XXX.- Pt.1.- 1967.
58. ОСТ 3-4046-85. Объективы. Метод измерения функции передачи модуляции.
59. Захарнев А.П. Погрешность экспериментальных оценок импульсной

и передаточных характеристик оптико-электронных приборов // Оптико-механическая промышленность.- 1986.- №9. – С.54-58.

Н а у к о в е в и д а н н я

Колобродов Валентин Георгійович

Кравченко Ігор Володимирович

Микитенко Володимир Іванович

**РОЗРОБЛЕННЯ ТА КОНТРОЛЬ
АВТОМАТИЗОВАНИХ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

Монографія

В авторській редакції

Підписано до друку 15.02.2020 р.
Формат 60х84/16. Друк офсетний
Гарнітура TimesNewRoman. Умов. друк. арк.: 9.9
Наклад прим.: 300. Замовлення № 15022/21

Видавець: ТОВ «НВП «Інтерсервіс»
м. Київ, вул. Бориспільська, 9
Свідоцтво: серія ДК № 3534 від 24.07.2009 р.

Виготовлювач: СПД Андрієвська Л. В.
м. Київ, вул. Бориспільська, 9
Свідоцтво: серія В03 № 919546 від 19.09.2004 р.