

Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк,  
Т. Р. Ключко

**ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ  
ДЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ  
ДЕТАЛЕЙ**

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

**Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко**

**Оптичні вимірювання  
для механічної обробки деталей**

**Монографія**

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2009

УДК 621.7.08:681.78  
ББК 34.96  
Т41

Рекомендовано вченою радою НТУУ «КПІ»  
(Протокол № 6 від 22 червня 2009 р.)

**Рецензенти:**

П. Б. Олексенко, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України  
Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова  
Національної академії наук України

В. О. Румбешта, д-р техн. наук, проф.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

Тимчик Г. С.

Т41 Оптичні вимірювання для механічної обробки деталей: Монографія  
/ Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк, Т. Р. Ключко. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. –  
332 с., іл. – 50 пр.

ISBN 978-966-622-327-5

Розглянуто теоретичні засади застосування оптичного вимірювання під час виготовлення надточних деталей механічною обробкою, проблеми створення та основні схеми контрольно-вимірювальних й електронних модулів у технології механічної обробки матеріалів. Наведено авторські дослідження з питань створення нових лазерних гібридних приладів і систем контролю та діагностики плинного стану технологічного процесу механічної обробки матеріалів.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, студентів старших курсів вищих навчальних закладів відповідно технічного та інженерно-медичного напрямку «Технологія приладобудування», «Оптичні прилади та системи».

УДК 621.7.08:681.78  
ББК 34.96

ISBN 978-966-622-327-5

© Г. С. Тимчик, В. І. Скицюк,  
Т. Р. Ключко, 2009

**ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	6
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАСАДИ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ</b>	7
§ 1.1. Основні проблеми виготовлення надточних деталей приладів у промисловому виробництві	7
§ 1.2. Контроль параметрів якості надточних деталей	12
§ 1.2.1. Фізична модель поверхні після технологічної обробки	13
§ 1.2.1.1. Модель поверхні деталі після токарної обробки	18
§ 1.2.1.2. Моделювання параметрів поверхні після шліфувальних операцій	24
§ 1.3. Класифікація і призначення оптичних контрольно-вимірювальних приладів	26
§ 1.4. Засади оптичних вимірювань механічних величин у точному приладобудуванні	27
§ 1.4.1. Дифракційні явища в оптичних контрольно-вимірювальних приладах	34
§ 1.4.1.1. Засади контролю розмірів елементів структур за тестовими дифракційними ґратками	45
<b>Перелік посилань до розділу 1</b>	58
<b>РОЗДІЛ 2. ОПТИКО-МЕХАНІЧНІ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b>	60
§ 2.1. Окулярний мікрометр	60
§ 2.2. Оптикатори	62
§ 2.3. Оптиметри	64
§ 2.3.1. Вертикальний окулярний оптиметр	65
§ 2.3.2. Вертикальний екранний оптиметр	70
§ 2.3.3. Горизонтальний окулярний оптиметр	72
§ 2.4. Інтерферометри	77
§ 2.4.1. Інтерферометри для контролю площини	77
§ 2.4.2. Інтерферометри для контролю сфер	79
§ 2.4.3. Інтерферометри для контролю асферичних поверхонь	83
§ 2.4.4. Інтерферометри для виміру висоти мікронерівностей або слідів обробки	85
§ 2.4.5. Багатопроменеві мікроінтерферометри	88
§ 2.5. Оптичні прилади вимірювання довжини	91
§ 2.5.1. Вертикальні довжиноміри	91
§ 2.5.2. Горизонтальні довжиноміри	92
§ 2.5.3. Оптико-механічні машини для вимірювання лінійних розмірів	96
§ 2.6. Інструментальні та універсальні мікроскопи	99

Наукове видання

Тимчик Григорій Семенович  
Скицюк Володимир Іванович  
Клочко Тетяна Реджинальдівна

**Оптичні вимірювання для механічної  
обробки деталей**

**Монографія**

*В авторській редакції  
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Підп. до друку 01.09.2009. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – ризографія. Ум. друк. арк. 19,3. Обл.-вид. арк. 32,09. Наклад 300 пр. Зам. № 9-209.

НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка»  
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
тел./факс (044) 241-68-78

## **ЗМІСТ**

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ЗАСАДИ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ</b>	<b>7</b>
§ 1.1. Основні проблеми виготовлення надточних деталей приладів у промисловому виробництві	7
§ 1.2. Контроль параметрів якості надточних деталей	12
§ 1.2.1. Фізична модель поверхні після технологічної обробки	13
§ 1.2.1.1. Модель поверхні деталі після токарної обробки	18
§ 1.2.1.2. Моделювання параметрів поверхні після шліфувальних операцій	24
§ 1.3. Класифікація і призначення оптичних контрольно-вимірювальних приладів	26
§ 1.4. Засади оптичних вимірювань механічних величин у точному приладобудуванні	27
§ 1.4.1. Дифракційні явища в оптичних контрольно-вимірювальних приладах	34
§ 1.4.1.1. Засади контролю розмірів елементів структур за тестовими дифракційними ґратками	45
<i>Перелік посилань до розділу 1</i>	58
<b>РОЗДІЛ 2. ОПТИКО-МЕХАНІЧНІ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ</b>	<b>60</b>
§ 2.1. Окулярний мікрометр	60
§ 2.2. Оптикатори	62
§ 2.3. Оптиметри	64
§ 2.3.1. Вертикальний окулярний оптиметр	65
§ 2.3.2. Вертикальний екранний оптиметр	70
§ 2.3.3. Горизонтальний окулярний оптиметр	72
§ 2.4. Інтерферометри	77
§ 2.4.1. Інтерферометри для контролю площини	77
§ 2.4.2. Інтерферометри для контролю сфер	79
§ 2.4.3. Інтерферометри для контролю асферичних поверхонь	83
§ 2.4.4. Інтерферометри для виміру висоти мікронерівностей або слідів обробки	85
§ 2.4.5. Багатопроменеві мікроінтерферометри	88
§ 2.5. Оптичні прилади вимірювання довжини	91
§ 2.5.1. Вертикальні довжиноміри	91
§ 2.5.2. Горизонтальні довжиноміри	92
§ 2.5.3. Оптико-механічні машини для вимірювання лінійних розмірів	96
§ 2.6. Інструментальні та універсальні мікроскопи	99

§ 2.6.1. Методи вимірювання розмірів деталі на мікроскопах	108
§ 2.7. Проектори	111
<i>Перелік посилань до розділу 2</i>	118

## **РОЗДІЛ 3. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ**

§ 3.1. Оптико-електронні прилади для вимірювання лінійних величин	119
§ 3.1.1. Фотоелектричні мікроскопи	119
§ 3.1.2. Телевізійні мікроскопи	125
§ 3.2. Прилади контролю розмірів	129
§ 3.2.1. Лазерні прилади контролю розмірів	132
§ 3.2.2. Лазерні дифракційні вимірювачі розмірів	142
§ 3.3. Контроль параметрів різьби	151
§ 3.4. Основні засади дії оптико-електронних приладів контролю шорсткості поверхні та структури деталі	158
§ 3.5. Оптичний контроль якості пластин	170
§ 3.5.1. Контроль товщини пластини	170
§ 3.5.2. Контроль дефектів пластин	174
§ 3.5.3. Контроль неплоскостності і прогину пластин	181
<i>Перелік посилань до розділу 3</i>	186

## **РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ У НАДТОЧНОМУ КОНТРОЛІ РОЗМІРІВ**

§ 4.1. Основні засади автоматизації оптичних вимірювань	188
§ 4.1.1. Використання ПЗЗ-приймачів зображення для автоматизації оптичних вимірювань	194
§ 4.1.1.1. Вимоги до інформаційних сигналів	204
§ 4.1.2. Автоматизовані лазерні скануючі пристрої	206
§ 4.2. Система контролю позиціонування та зносу різального інструмента на металообробних верстатах	216
§ 4.3. Автоматизований контроль періодичних просторових структур	218
§ 4.4. Система автоматизованого вимірювання діаметру і еліптичності тонких дротів	232
§ 4.5. Автоматизована система вимірювання параметрів шорсткості поверхні деталей	246
<i>Перелік посилань до розділу 4</i>	255

## **РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ**

§ 5.1. Визначення зношування різального інструмента за допомогою	258
--	-----

оптико-електронних пристроїв	258
§ 5.2. Визначення стану виготовлення надточних деталей на засадах поверхневих акустооптичних взаємодій	263
§ 5.2.1. Визначення взаємодії та стану об'єктів технологічного процесу на великих відстанях	263
§ 5.2.2. Дифракція світла при відбитті від акустичних ефектів та неоднорідностей поверхні на ближніх відстанях	265
§ 5.3. Основні схеми побудови лазерних систем аналізу динамічних сигналів при механічній обробці матеріалів	269
§ 5.3.1. Аналітична модель операційних перетворень	272
§ 5.3.2. Пристрої аналізу спектрально-кореляційних характеристик електричних сигналів	287
§ 5.3.3. Лазерні пристрої параметричного контролю динамічних сигналів технологічного процесу різання	292
§ 5.3.4. Інтерферометричні аналізатори динаміки різання	295
§ 5.4. Інтегровані аналізатори віброакустичних і електромагнітних сигналів різання	301
§ 5.5. Автоматизація контролю стану об'єктів технологічного процесу	314
<i>Перелік посилань до розділу 5</i>	327
<b>ПІДСУМКИ</b>	331



## ПЕРЕДМОВА

Підвищення економічних показників машин є найважливішим завданням сучасного машинобудування й значною мірою залежності від якості обробки, що визначається стабільністю технологічного процесу, режимів різання, геометричних параметрів різального інструмента, а також його розмірної стійкості, пружних і температурних деформацій технологічної системи, настроювання верстата, його точності й інших чинників. При такому різноманітті діючих чинників і заданих вимог діагностика процесу металообробки вимагає насамперед надійних й ефективних засобів діагностики технологічних параметрів процесу металообробки. Надійність та інформативність цих засобів значною мірою визначає їхня ефективність, а також ефективність всієї системи діагностики процесу в цілому. Тому в сучасних умовах усе більше широка увага приділяється розробці нових й удосконалюванню технічних засобів контролю процесів металообробки на прогресивних виробничих підприємствах і за кордоном, і у нашій країні.

У точному приладобудуванні та машинобудуванні усе більше високі вимоги висуваються до якості деталей, виготовлених механічною обробкою. При цьому якість деталей визначається шорсткістю поверхні деталі, а також відповідністю її геометричних розмірів і форми раніше встановленим на них допускам. Останні, у свою чергу, залежать від стабільності технологічних процесів при їхній обробці й точності використовуваного металообробного устаткування. Істотне підвищення точності металообробки та якості виготовлених деталей досягається внаслідок застосування відчутників, приладів діагностики й контролю технологічних процесів металообробки. Такі технічні засоби повинні забезпечувати контроль стану різального інструмента й параметрів технологічного процесу (режимів металообробки раціонального використання устаткування), а також якості виготовлення деталі у процесі її обробки. За фізичною сутністю явищ, покладених в основу приладів контролю параметрів процесу металообробки, останні можуть бути підрозділені на віброакустичні, електромагнітні, пневматичні, електроконтактні, механічні, оптичні та оптико-електронні. Кожна із цих груп у різній мірі опанована промисловістю, проте застосовані вони практично для всього технологічного металообробного устаткування.

Найбільш перспективними для використання в умовах прецизійної автоматизованої металообробки є електромагнітні, оптичні й оптико-електронні прилади, що мають найвищу точність й швидкодію. Саме тому найбільша увага приділяється їхньому розвитку й практичному вдосконалюванню багатьма закордонними фірмами та вітчизняними підприємствами. Вимірювання розмірів оптичними приладами забезпечує найвищу точність, що конче потрібно для розвитку прецизійного приладобудування, тому пропонується праця має на меті викладення основних засад дії сучасних оптичних контрольно-вимірювальних приладів.



## **РОЗДІЛ 1. ЗАСАДИ ОПТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАНЬ**

Однією з нагальних проблем виготовлення надточних приладів вимірювання часу, механічних величин тощо, є проблема забезпечення точності та якості деталей цих приладів в умовах серійного, а також і дрібносерійного автоматизованого виробництва, що набуває особливого значення для забезпечення стабільного життєвого циклу надточних приладів. При виготовленні таких деталей основними є похибки формоутворення, що впливають на їх точність. Так, наприклад, при виготовленні надточних приладів, особливий вплив на точність та надійність їх роботи мають похибки виготовлення, які впливають на надійність функціонування приладів та систем. Тому проблема точності та якості деталей є нагальною для сучасного приладобудування.

### **§ 1.1. Основні проблеми виготовлення надточних деталей приладів у промисловому виробництві**

Якість виготовленої деталі при остаточному контролі на виробництві визначається відповідністю її геометричних розмірів і форми, встановленим на них допускам, та шорсткістю поверхні деталі. Останні, у свою чергу, залежать від стабільності технологічних процесів при їх виготовленні, а також точності використаного металообробного обладнання. Істотне підвищення точності обробки, якість виготовлених надточних деталей досягається внаслідок застосування систем та засобів діагностики та контролю стану технологічного процесу механічної обробки матеріалів. Ці технічні засоби повинні забезпечувати контроль стану параметрів технологічного процесу (режимів металообробки, раціонального використання обладнання), а також якості виготовлення деталі у процесі її обробки. Забезпечення якості виготовлення впливає також на економічні аспекти виробництва, оскільки порушення технологічного процесу обробки призводить до значних економічних втрат.

Точність формоутворення оброблюваної поверхні визначається станом різального інструмента. При цьому значущими чинниками є також загальні умови різання - режими обробки, матеріал пари інструмента і деталі, технічні параметри, стан технологічного процесу та металообробного верстата. При цьому актуальною постає задача контролю якості деталей надточних приладів та діагностики стану технологічного процесу обробки.

При виготовленні надточних деталей ключовим чинником впливу на їх точність є стан процесу обробки та зокрема стан різального інструмента. Вирішення такої задачі полягає у поєднанні методу контролю, оцінювання та діагностики стану технологічного процесу та різального інструмента.

Досягнення стабільної якості механічної обробки різанням на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), наприклад CNC, можливо лише при використанні систем аналізу та діагностики динаміки плинного стану різального інструмента, технологічного обладнання під час виготовлення

деталі. Отже, перспективним напрямом розвитку сучасного виробництва є вирішення задачі плинного контролю ситуацій, що виникають в процесі технологічного процесу обробки металу, та побудова методів і систем реалізації цієї задачі. Тому найбільш актуальною є розробка нових більш надійних методів та систем оцінювання динаміки стану технологічного процесу механічної обробки деталей для автоматизованого виробництва.

Вирішення цієї проблеми з огляду на економічні аспекти є необхідним у серійному виробництві, коли передбачаються значні партії деталей і неможливо допустити втрати матеріалу і якості кінцевого продукту. Тому при створенні автоматизованих ліній, гнучких виробничих систем (ГВС), робототехнічних комплексів (РТК) для виготовлення деталей приладобудування конче необхідні засоби контролю, діагностики стану усіх об'єктів технологічного процесу, тобто обробного обладнання, інструмента і деталі безпосередньо у процесі обробки. Під працездатністю автоматичного устаткування розуміється можливість функціонування згідно заданої програми та відповідності показників якості деталей згідно технічних вимог.

Надточні прилади та системи, наприклад гіроскопічні, отримали на цей час широке розповсюдження в різних галузях техніки і є основою навігаційних приладів у авіації, ракетобудуванні, морському флоті. Ротори гіроскопів зазвичай мають дві – три ступені свободи, що забезпечується підвіскою на декількох осях. Вплив на осі здійснюють зовнішніми коригуючими моментами, що утворюють спеціальними прецизійними мікроелектродвигунами, від якості виготовлення яких залежить точність роботи системи. Отже точність роботи приладу залежить від технологічних похибок виготовлення деталей, що виникають внаслідок порушення режимів технологічних процесів виготовлення [1.1, 1.2]. Похибки виготовлення та складання гіроприладів можна класифікувати згідно існуючих видів (рис. 1.1).

Тобто проблема підвищення точності роботи системи є неможливою без розробки методів оцінювання точності виготовлення деталей, оскільки похибки формоутворення прецизійних деталей можуть призвести до відхилення прецизійного гіроприладу. Отже, технологічні похибки формоутворення деталей змінюють точність роботи, призводять до додаткових моментів збудження, що впливає, наприклад на характер руху гіроскопа.

При визначенні допусків на точність виготовлення та складання гіроприладів у кардановому підвісі виходять від потрібної точності приладу на нерухомій основі, що не зовсім правомірно, оскільки деякі технологічні похибки, наприклад неперпендикулярність осей карданового підвісу, яка практично не впливає на відхилення прецизійного гіроприладу, можуть впливати на роботу гіроскопа під час вібрацій, маневрів об'єкта тощо. З цього випливає, що точність роботи прецизійного приладу залежна від точності виготовлення деталей, тому контроль точності виготовлення, особливо в умовах автоматизації технологічних процесів, є нагальною проблемою приладобудівної промисловості.

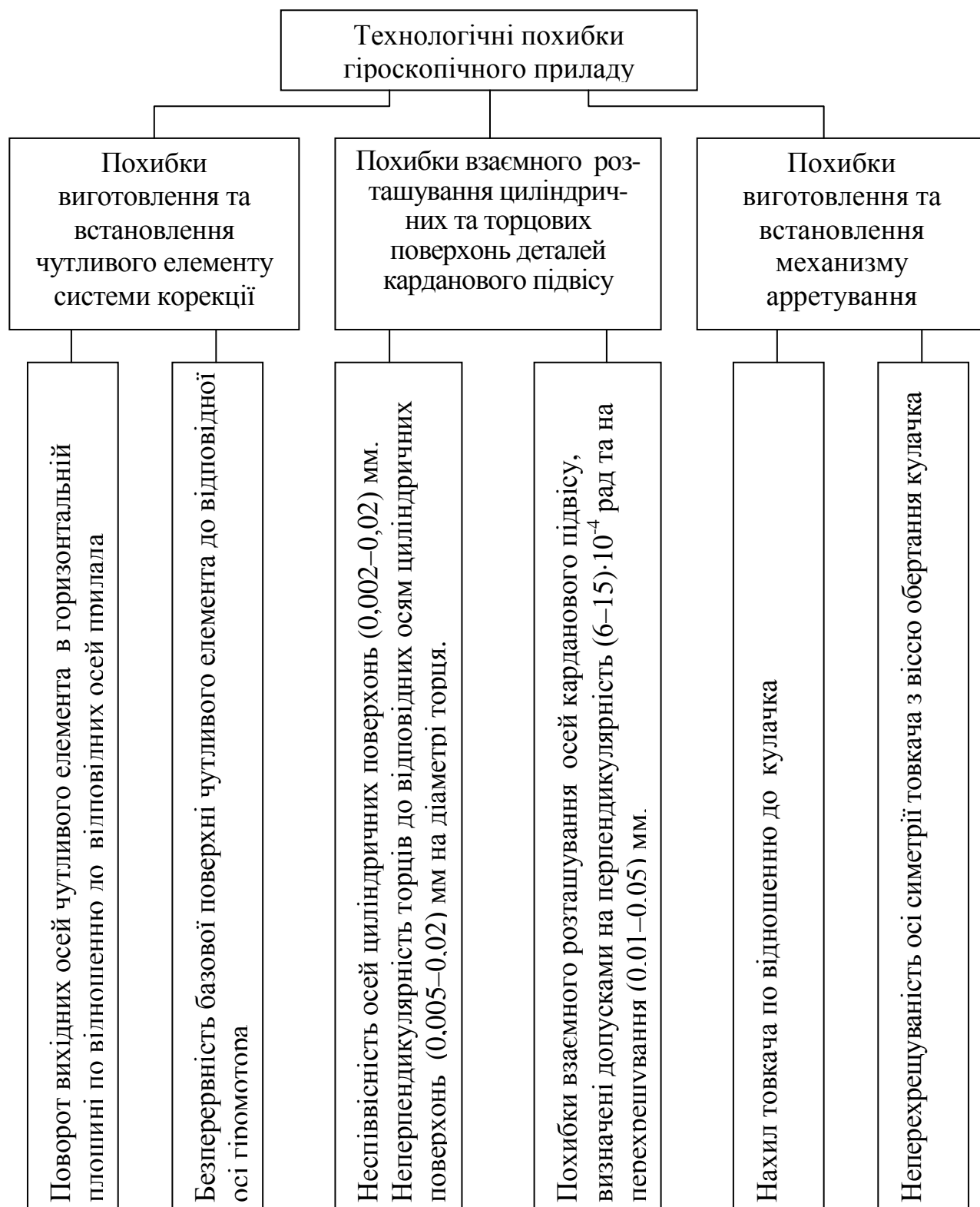


Рис. 1.1. Класифікація видів похибок виготовлення та складання надточних приладів (на прикладі гіроприладів [1.1, 1.2])

Створення діагностичних систем передбачає автоматизацію процесу діагностики, сполучення із системою керування верстатів з ЧПК, використання мікропроцесорів, ЕОМ, створення баз даних та відповідних баз знань.

Створення комплексно автоматизованих ліній, гнучких виробничих систем (ГВС), робототехнічних комплексів (РТК), роботизованих транспортних пристроїв тощо значно розширило сферу застосування відчутників внутрішньої інформації. Вони можуть бути використані для контролю технічного стану, адаптації технологічного устаткування до умов промислового виробництва.

Для виміру діагностичних параметрів застосовують відчутники внутрішньої інформації, вбудовані в систему технологічного обладнання, а також зовнішні системи як пристрої для металообробного обладнання [1.3, 1.4]. Створення таких методів та пристроїв для систем контролю та діагностики є актуальними задачами для багатьох наукових установ, промислових фірм, закордонних і вітчизняних виробництв [1.5 – 1.7].

Відчутники внутрішньої інформації можуть бути використані для контролю технічного стану, блокування й адаптації технологічного обладнання щодо технологічного процесу. Контроль функціонування та визначення тривалості циклу РТК і ГВС найбільш просто забезпечуються застосуванням відчутників електричних параметрів, часових інтервалів, параметрів руху. Електричні сигнали від фізичних процесів у ТОС використовуються також для контролю джерел енергії, стану технологічного процесу (стану інструмента, рушійних систем, допоміжних технічних механізмів). Інформативними є відчутники, що вимірюють напруги в конструкціях (тензометричні й моментні відчутники). Для вимірювання та контролю геометричних параметрів оброблених деталей, інструмента, затискних механізмів, периферійних пристроїв застосовуються відчутники системи з ЧПК (аналогові, фазові, імпульсні), електричні й пневматичні мікрометри, контактні, фотометричні тощо. Досить широке застосування мають також відчутники температури (термопари, терморезистори, оптоволоконні), вібрацій (п'єзоелектричні, вихрострумові, оптоелектронні). Наразі також застосування мають чутники торкання РІ до поверхні деталі, що застосовують, наприклад для вимірювання геометричних розмірів деталі у координатно-вимірювальних машинах (КВМ), що необхідно при отриманні високої точності виготовлення.

У діагностичних інформаційно-керуючих системах обробки матеріалів виявляються відмови або зниження точності роботи відчутників розташування, швидкості, зміни температури або інші похибки. Все більше поширюються зовнішні системи лазерні й фотоелектричні; рентгенівські, ультразвукові, системи, які сприймають інфрачервоні й радіаційні випромінювання, акустичні поля тощо, призначені для контролю параметрів деталі технологічного процесу [1.3 - 1.9].

Під працездатністю автоматичного устаткування розуміється можливість функціонування за заданою програмою, відповідності показників якості устаткування й продукції вимогам технічної документації. Це також обумовлює

розроблення проблемно-орієнтованого програмного забезпечення для кращого функціонування систем обробки інформації від технологічного обладнання та прийняття відповідних рішень щодо автоматизованого виготовлення прецизійних деталей приладів.

Сучасними методами дослідження механізму зношування інструментів при різанні матеріалів є прямі оптичні методи, метод радіоактивних ізотопів, метод мікрорентгеноспектрального аналізу [1.8].

Продукти зношування лез, виготовлених зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, через свою малість розмірів виявити вкрай важко, тому навіть найбільш доступний оптичний метод з використанням мікроскопів з будь-яким збільшенням не дає позитивних результатів. Це пов'язане з тим, що продукти зношування, які потрапляють у поле зору мікроскопа, не можуть бути виявлені серед часток оксидів та безлічі наслідків руйнувань, пов'язаних з пластично деформованими мікро- і макронерівностями на стружці й поверхні різання. Проте метод радіоактивних ізотопів не дозволяє виявити й оцінити форму та розміри окремо взятої частки продуктів зношування і може бути використаний тільки для орієнтовного визначення зношеної маси та залежності її від режиму, параметрів і геометрії різальної частини інструмента.

Основна вада вищезначених методів полягає у тому, що їх можливо застосовувати лише в умовах лабораторних досліджень, але не в умовах виробництва, оскільки вони досліджують зношування тільки статично та не реєструють його динаміку в процесі металообробки, а, отже, вони не відповідають вимогам контролю плинного процесу різання і, що головне, плинного контролю обробки.

Отже, визначимо найбільш застосовані та перспективні існуючі оптичні методи та засоби вимірювання та контролю стану технологічного процесу виготовлення надточних деталей. Ці методи здебільшого застосовуються при контролі, діагностиці стану різального інструмента, деталі, технологічного обладнання.

Проте застосування приладів контролю деталей, виготовлених механічною обробкою, здебільшого металічних, вимагає розгляду особливостей формотворення та параметрів поверхні залежно від типу технологічного процесу механічної обробки.

Моделювання поверхні деталі необхідне для подальшої обробки інформації оптичними методами, наприклад у аналізаторах спектру, при аналізі відбитого світлового випромінювання від поверхні, що оброблюється. Тобто створення оптичних контрольно-вимірювальних приладів та систем діагностики плинного стану технологічного процесу обробки деталей неможливе без визначення первинних характеристик формотворення поверхні деталі.

Розглянемо модель поверхні деталі при виготовленні її механічною обробкою на токарних верстатах та після шліфувальних операцій, оскільки це найбільш розповсюджені типи обробки металевих виробів.

## § 1.2. Контроль параметрів якості точних деталей

Якість поверхні визначає сукупність всіх властивостей поверхневого шару матеріалу. В умовах експлуатації виробів приладобудування зовнішнім впливам в першу чергу піддаються поверхні взаємодії. Знос поверхонь тертя, зародження тріщин втомлення, тощо – це процеси, котрі здійснюються на поверхні деталей і в деякому прилеглому до поверхні шарі. Природно, що надання поверхням деталей приладів спеціальних властивостей сприяє суттєвому підвищенню показників якості машин і приладів в цілому, і, в першу чергу, показників надійності. Якість поверхні є єдиним з найважливіших чинників, якій забезпечує високі експлуатаційні властивості деталей приладів.

Найбільш суттєвим для практики приладобудування є встановлення залежностей між параметрами конкретного технологічного процесу обробці поверхні, показниками якості поверхневого шару і показниками деталей машин і приладів в експлуатації.

Якість поверхневого шару матеріалу обумовлено властивостями матеріалу і методами обробки: механічної, електрофізичної, електрохімічної тощо. В процесі механообробці (різання лезовим інструментом, шліфування, полірування тощо) поверхневий шар деформується під дією навантажень і температури, а також забруднюється домішками (частинками абразиву, кисень) та іншими інорідними включеннями [1.10].

Під терміном поверхневий шар приймається сама поверхня і її деякий поверхневий шар, який відрізняється від матеріалу серцевини деталі. Глибина шару  $h$  (рис. 1.2,а) розрізняється залежно від умов експлуатації деталі (від декількох мікрометрів для вимірюючого калібру до декількох міліметрів для валу машин). Схематична будова поверхневого шару приведена на рис. 1.2,б. Зміцнений шар, якій складається з верхнього шару 1, шару 2 з текстурою, в якому зерна мають переважну орієнтацію, і пластично деформованого шару 3, який має зменшену густину в порівнянні з серцевиною 4, в ньому суттєво збільшено кількість дислокацій і інших дефектів будови кристалічної ґратки. Цей шар має збільшену твердість у порівнянні з серцевиною.

Якість поверхневого шару визначається двома групами характеристик. Геометричні характеристики якості поверхні: відхилення форми (макрогеометрія); хвилястість, шорсткість (мікрогеометрія); субмікрошорсткість.

Їх розрізняють за критерієм, яким слугує відношення кроку  $S$  до висоти нерівностей  $R$ :

- відхилення форми  $\frac{S}{R} > 1000$ ;
- хвилястість  $\frac{S}{R} = 50 \dots 1000$ ;
- шорсткість  $\frac{S}{R} < 50$ .

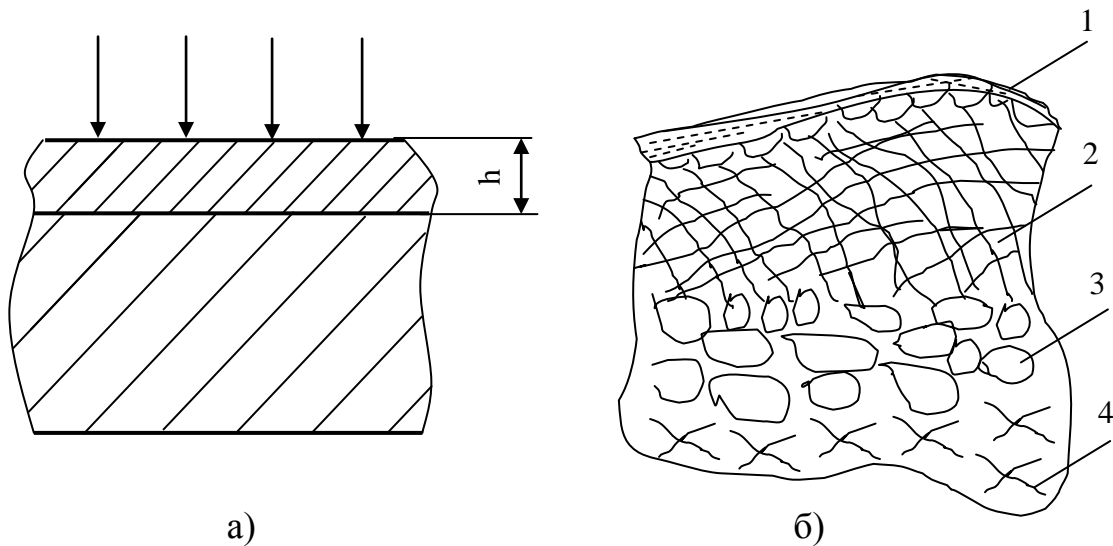


Рис. 1.2. Внутрішня структура поверхневого шару деталі

Субмікроскопічний рельєф (СМР) поверхні має особисту природу виникнення – його параметри насамперед залежать від внутрішніх недосконалостей металу, який деформується, і прикладених напружень. Для якісних і кількісних характеристик СМР велику роль грають плівки окислів і абсорбованих шарів рідини. Кількісний характер СМР визначений величиною виступів і упадин, а також їх формою і частотою розташування на поверхні матеріалу.

Відомо вплив СМР, наприклад, на адгезію, адсорбцію, відбиваючу здатність та ін. Але закони утворення СМР і чисельні характеристики, як при його виникненні, так і при навантаженні, наприклад, тертям, поки що не достатньо вивчені і при оцінці якості поверхні не враховують, а тому не нормують.

Складність рішення задач, пов'язаних з нормуванням, технологічним забезпеченням і контролем геометричних параметрів реальних поверхонь, полягає в тому, що (відхилення форми, хвилястість і шорсткість) їх досить складно виділити у відокремленість. У реальних виробничих умовах можуть зустрітись комбінації таких поверхонь.

### § 1.2.1. Фізична модель поверхні після технологічної обробки

При конструюванні необхідно регламентувати параметри, які характеризують поверхні. Але в багатьох випадках вимоги до якості поверхні можуть бути виявлені лише експериментальним шляхом, оскільки залежність різних експлуатаційних властивостей від різних фізичних і геометричних параметрів складні і недостатньо досліджені.

Тертя і знос деталей значно пов'язані з нерівностями, хвилястістю, мікронерівностями, а також з напрямком штрихів (слідів обробки). Характеристики мікронерівностей і хвилястості виявляється на розмірах тих ділянок, в яких знаходиться зона фізичного контакту, тобто визначає контурну площу торкання. Наявність хвиль призводить до зменшення опорної площі в 5-



10 разів в порівнянні з рівною шорсткою поверхнею. Процес контактування поверхонь, які мають мікронерівності, в значній мірі визначається формою і розмірами останніх. Для оцінки цього впливу належить враховувати не тільки граничні значення відхилень від правильної геометричної форми, але й взаємне розташування і форму макронерівностей спряжених поверхонь деталей.

Оптимальна шорсткість характеризується висотою, кроком і формою нерівностей (радіусом упадин, кутом нахилу нерівностей в напрямку руху тощо). Параметри оптимальної шорсткості залежать від якості мастила, умов роботи поверхонь, що зазнають тертя, їх конструкцію і матеріалу. Діапазон  $R_{\text{опт}}$  зазвичай дуже малий. Мікротвердість поверхневого шару впливає на зносостійкість. Наприклад, деформаційне зміцнення, яке виникає внаслідок обробки різанням, зменшує знос поверхонь в 1.5-2 рази. Шорсткість поверхні впливає також на міцність деталей. Так при роботі в умовах переміщених навантажень руйнування деталей пояснюється концентрацій напруг внаслідок наявності нерівностей. Чим менше шорсткість, тим менше можливість виникнення поверхневих тріщин від втоми металу. Оздоблена обробка деталей (доводка, полірування) забезпечує значне підвищення межі їх втомленої міцності.

Мала шорсткість поверхні позитивно впливає на антикорозійну стійкість деталей, що необхідно у тому випадку, коли не можна використовувати захисне покриття (наприклад, поверхні циліндрів двигунів тощо). Дотримання належної якості поверхні необхідно в спряженнях, що відповідають умовам густини, герметичності, теплопровідності. Зниження шорсткості поверхні деталей спричиняє покращення здатності до відбиття акустичних, електромагнітних, світлових хвиль, зменшення втрат у хвилеводах, резонаторах, полегшується чищення деталей від пилу, поверхневих забруднень тощо.

Шорсткість і хвилястість поверхні деталі взаємопов'язані з точністю розмірів, оскільки встановлена точність, наприклад, спряження залежать від співвідношення висоти нерівностей і поля допуску (точність обробки) деталей. Для додержання заданої точності деталей у приладі необхідно також при обробці кожної деталі додержання оптимальної шорсткості кожної поверхні.

Багато характеристик якості поверхні, які впливають на експлуатаційні характеристики приладу, залежать від технологічного методу і умов виготовлення деталей. Виходячи з цього можна призначити визначені умови обробки (режими обробки, технологічний метод тощо), які забезпечать отримання поверхні з необхідними параметрами якості.

Додержання якості поверхні формується під впливом технологічної спадкоємності. Під технологічною спадкоємністю розуміють перенос властивостей деталі, що оброблюється, від попередніх технологічних операцій до наступних, які впливають на експлуатаційні характеристики всього приладу в цілому. При цьому зміна експлуатаційних властивостей визначається методами і режимами, які застосовують на окремих операціях термічної і

механічної обробки, типом, станом РІ, розмірами припусків, послідовністю і складом операцій технологічного процесу.

Висока точність завжди відповідає малої шорсткості і хвилястості поверхні (при цьому висока точність завжди забезпечує високу надійність роботи приладу). Це визначено не тільки умовами роботи спряжених деталей, але і необхідністю отримання надійних результатів вимірів виробничих метрологічних приладів і пристроїв.

Задана поверхня після токарної обробки деталі типу “вал” діаметром  $D_0=2r_0$ , де  $r_0$  – заданий радіус деталі для ідеальній поверхні по параметрах шорсткості (якості) (рис. 1.3).

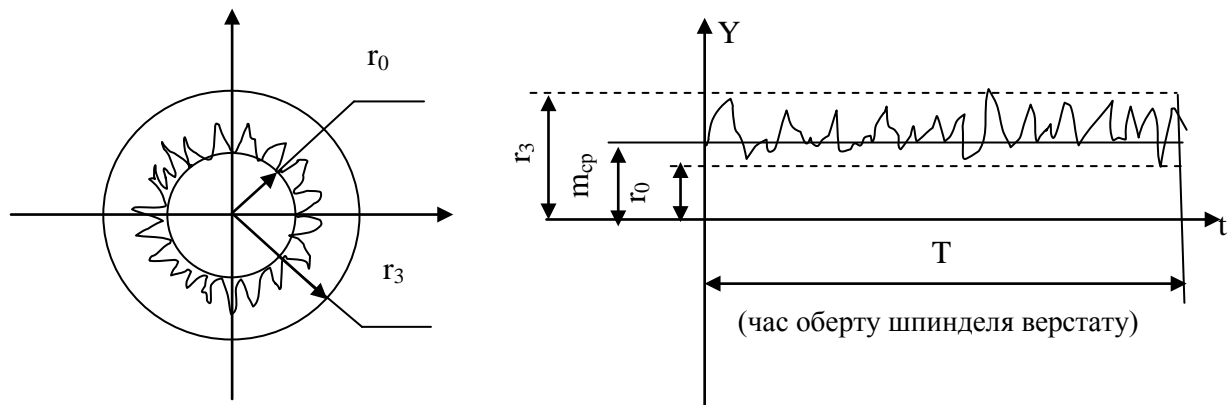


Рис. 1.3. Характеристики шорсткості поверхні деталі типу “вал”

Базові параметри шорсткості поверхні:

1) Висота нерівності профілю по 10 точках  $R_z$  [1.11]:

$$R_z = \frac{\sum_{k=1}^5 |y_{pmk}| + \sum_{k=1}^5 |y_{vmk}|}{5},$$

де  $y_{pmk}$  – висота k-го найбільшого виступу профілю;

$y_{vmk}$  – висота k-ої найбільшої упадини профілю.

(відстань від середньої лінії профілю поверхні).

2) Середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$  в межах базової довжини  $l$  (довжина лінії, яка використовується для виділення нерівностей, які характеризують шорсткість поверхні);

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx; \quad R_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y_k|,$$

де  $l$  – базова довжина;  $n$  – число обраних точок профілю на базовій довжині.

Періодичний профіль шорсткості деталі формується внаслідок точіння, фрезерування тощо. Аперіодичний профіль шорсткості деталі формується внаслідок шліфування, полірування, доводці, електроерозійної обробці.

Періодичний профіль описується періодичною функцією; аперіодичний профіль – випадковою функцією.

Одним з головних параметрів шорсткості є  $R_{max}$  – найбільша висота нерівностей – відстань між лінією виступів профілю і лінією упадин профілю в межах базової довжини ( $R_p$  – висота найбільшого виступу профілю;  $R_v$  – глибина найбільшої упадини профілю) (Рис. 1.4,а).

Вимоги до шорсткості не впливають на вимоги дефектності (наприклад, раковина тощо).

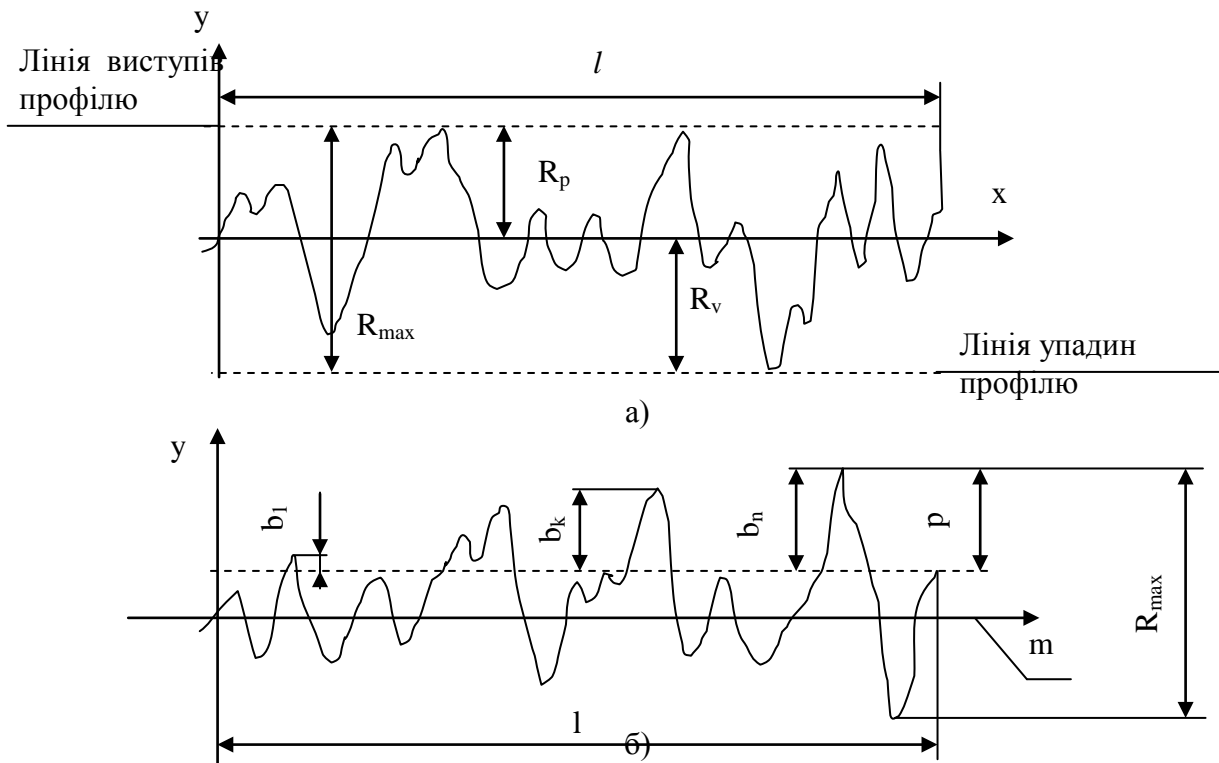


Рис. 1.4. Загальні параметри шорсткості поверхні

Шорсткість поверхні оцінюється за нерівностями профілю (найчастіше поперечною), якій отримуємо внаслідок перерізу реальної поверхні площиною (найчастіше в нормальному перерізі). Для відокремлення шорсткості поверхні від інших нерівностей з відносно великими кроками (відхилення форми і хвилястість) її розглядають у межах обмеженої ділянки, довжина якої є базовою довжиною  $l$ .

Базою для відхилення профілю є середня лінія профілю  $m$ . Відносна опорна довжина профілю  $t_p$  – відношення опорної довжини профілю до базовий довжини на заданому рівні перерізу  $p$ , визначається:

$$t_p = \frac{\eta_p}{l},$$

де

$$\eta_p = \sum_{k=1}^n b_k,$$

тобто сума довжин відрізків, які відсікаються на даному рівні в матеріалі профілю лінією, яка є еквідистантною середньої лінії в межах базової довжини (Рис. 1.4,б).

Експлуатаційні властивості шорсткості поверхні визначених для зносостійкості в усіх видах тертя визначаються  $R_a$  ( $R_z$ ),  $t_p$  напрямлені нерівності. Нормування параметрів  $S$  і  $S_m$  (середній крок місцевих упадин і середній крок нерівностей поверхні), які характеризують взаємне розташування (відстань) характерних точок нерівностей вершин (максимумів) і точок перетину профілю з середньою лінією (нулів профілю), для поверхонь, профіль яких описується процесами, близьких до випадкових, можливо спектральними характеристиками профілю (які виражені через кореляційну функцію профілю). Ця властивість крокових параметрів є важливою не тільки для обліку впливу нерівностей на експлуатаційні властивості поверхні, але дозволяє розв'язувати задачі, пов'язані з метрологічним забезпеченням якості поверхні, достатньо простими методами, частково задачі, які є пов'язаними з визначенням необхідної довжини для виміру параметру при заданій точності.

У додатку до кількісних параметрів доцільно нормувати напрямок нерівностей, наприклад, в зв'язку з напрямком відносного переміщення тертьових спряжених поверхонь чи струменя рідини чи газу відносно поверхні, а також забезпечення необхідної зносостійкості, вібросійкості, міцності конструкції при циклічних навантаженнях.

Хвилястість поверхні є елементарним відхиленням поверхні будь-якої форми. Це сукупність нерівностей на поверхні, що періодично повторюються та виникають внаслідок коливань чи відносно коливальними рухами в системі технологічного обладнання, в тому числі РІ, заготовок. Хвилястість визначається на нормальному перерізі поверхні, причому шорсткість і відхилення форми виключаються.

Параметри хвилястості визначені наступним чином:

- відхилення в реальному перерізі круглих деталей, у яких крок менше 1/15 кола;
- відношення кроку до висоти більше 40;
- висота хвилястості – середнє арифметичне значення з 5 значень висоти нерівностей.

Найбільш розповсюдженим є варіант для виробів приладобудування, коли вказано чисельне значення параметру, яке відповідає найбільш грубій шорсткості поверхні, що допускається, тобто найбільшому граничному значенню для параметрів  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S$ ,  $S_m$  до найменшого граничного значення параметру  $t_p$ .

### § 1.2.1.1. Модель поверхні деталі після токарної обробки

Розглянемо випадок, коли поверхня деталі формується в результаті токарної обробки, наприклад, поверхня валу (Рис. 1.5,а). Шорсткість такої поверхні може бути представлена періодичною функцією, яка описана рядами Фур'є, які складаються з простих гармонічних коливань з циклічними частотами, кратними основній циклічній частоті  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  (Рис.1.5,б).

В даному випадку припустимо, що  $T$  – час одного оберту деталі. При цьому вершина РІ проходить шлях  $L = 2\pi r_{\text{реал}}$  тобто  $r_{\text{реал}}$  – радіус валу з урахуванням параметрів шорсткості, хвилястості поверхні, тобто з урахуванням СМР.

$$\text{Отже } r_{\text{реал}} = r_0 \pm \int_0^L r dx.$$

Період  $T$  функції можна подати через режими різання, тобто шлях  $L = T_{\text{обр}} V_p$ , тоді  $T_{\text{обр}} = \frac{2\pi R_{\text{реал}}}{V_p}$  – часовий параметр періодичної функції, яка визначає формоутворення шорсткості поверхні, тобто  $0 < t < T_{\text{обр}}$ .

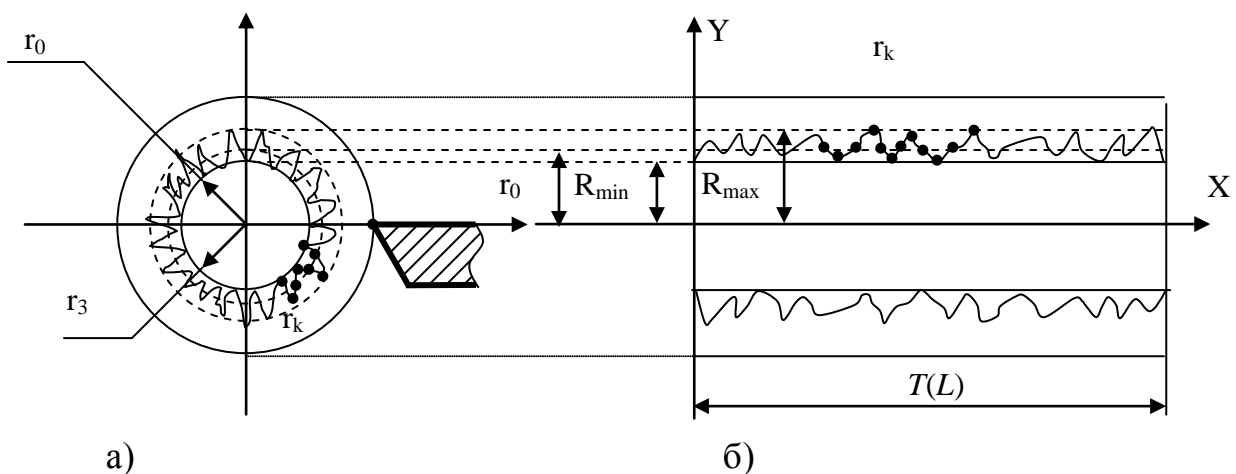
Отже, використовуючи принцип суперпозиції, представимо функцію шорсткості поверхні в загальному вигляді [1.12]:

$$F_{\phi \delta}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \phi_k), \quad (1.1)$$

де  $A_k$  – амплітуда  $k$ -ої точки шорсткості поверхні;

$$\omega_k = \frac{2k\pi}{T} \text{ де } T \text{ – період функції.}$$

Оскільки нормування шорсткості відбувається на кінцевій (базовій) довжині поверхні з кінцевим числом  $n$  обраних точок поверхні, функцію шорсткості доцільно розглядати для числа  $n$  точок поверхні, тобто:



а – поперечний переріз деталі; б – поздовжній переріз

Рис. 1.5. Характеристики поверхні деталі після токарної обробки

$$F_{\text{шф}n}(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k). \quad (1.2)$$

Тоді поверхня валу після токарної обробки можна описати, користуючись розкладенням (при  $T = 2\pi$ ) на інтервалі напівперіоду  $[-\pi; \pi]$ :

$$F_{\text{шф}n}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos kt + b_k \sin kt, \quad (1.3)$$

де амплітудний спектр визначається виразом  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,

а фазовий спектр функції  $\varphi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}$ .

Коефіцієнти  $a_0$ ,  $a_k$ ,  $b_k$  визначені формулами Фур'є – Ейлера (для періоду  $T=2\pi$ ):

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) dt; \\ a_k &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) * \cos \frac{2k\pi}{T} t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) * \cos ktdt = 0; \\ b_k &= \frac{1}{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) * \sin \frac{2k\pi}{T} t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) * \sin ktdt. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Для зручності обчислення можна представити функцію шорсткості в комплексній формі, використавши формули Ейлера:

$$\begin{aligned} F_{\text{шф}n}^{\text{ТОК}}(t) &= \sum_{k=1}^n F_k e^{j \frac{2k\pi}{T} t}, \\ F_n &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} F_{\text{шф}n}(t) e^{-j \frac{2k\pi}{T} t} dt, \\ F_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_{\text{шф}n}(t) e^{-jkt} dt \quad (\text{для } T = 2\pi) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Якщо представити функцію шорсткості гармонічною функцією з випадковим чином розподіленими параметрами  $F_{\text{шф}k}(t) = r_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$ , то спектр Фур'є шорсткої поверхні має вираз у межах періоду обробки:

$$\begin{aligned} F(f_x, f_y, t) &= \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-R_0}^{R_0} \int_{-T_{\text{обр}}/2}^{T_{\text{обр}}/2} F_{\text{шф}}(x) F_{\text{шф}}(y) F_{\text{шф}}(t) \times \\ &\times \exp[-j(f_x x + f_y y)] \exp[-j \frac{2k\pi}{T} t] dx dy dt \end{aligned} \quad (1.6)$$

При цьому можна визначити спектральні характеристики, подаючи функцію в колових координатах. Функції  $F_{\text{шфн}}(t)$  обмежена значенням  $R_{\text{max}}$ , тобто максимальною висотою виступу шорсткої поверхні (за суттю є  $R_{\text{реал}}$ ). Для того, щоб визначити спектральні характеристики функції поверхні, перетворюємо координати наступним чином:

$$\begin{aligned} r^2 &= x^2 + y^2; \quad \rho^2 = f_x^2 + f_y^2; \quad \varphi = \text{tg}^{-1}(f_y/f_x); \\ x &= r \cos \theta; \quad f_x = \rho \cos \varphi; \quad dx dy = r dr d\theta; \\ y &= r \sin \theta; \quad f_y = \rho \sin \varphi; \quad \theta = \text{tg}^{-1}(y/x). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Тоді для періодичної функції з періодом  $2\pi$  (для токарної обробки поверхні), підставляючи вираз (1.7) у (1.6), отримуємо:

$$F(\rho) = F(f_x, f_y, f_t) = \int_0^{R_{\text{max}}} r dr \int_0^{2\pi} \exp[-j\rho r \cos(\theta - \varphi)] d\theta \int_0^T \exp\left[-j\frac{2\pi}{t}\right] dt. \quad (1.8)$$

Використав відомий вираз для функції Бесселя, перший ряд нульового порядку:

$$I_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp[-jz \cos(\theta - \varphi)] d\theta. \quad (1.9)$$

Приведемо вираз (1.8) до вигляду (1.9):

$$F(\rho) = 2\pi \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} I_0(\rho r) r dr. \quad (1.10)$$

За допомогою виразу для функції Бесселя першого порядку першого ряду, отримуємо вираз (1.10) в наступному вигляді:

$$F(\rho) = \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \quad (1.11)$$

$$(\text{при } z I_1(z) = \int_0^z \alpha I_0(\alpha) d\alpha)$$

Отже, спектральні характеристики функції шорсткості поверхні співставлені в залежність від висоти максимального виступу профілю поверхні деталі.

Остаточно проінтегруємо вираз (1.11) за формулою (1.7) та отримуємо

$$\begin{aligned} F(\rho, t) &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \int_{-T_{\text{обр}}/2}^{T_{\text{обр}}/2} \exp(-j\omega t) dt = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \int_{-T_{\text{обр}}/2}^{T_{\text{обр}}/2} \exp\left(-j\left|\frac{2\omega}{T} = \frac{V_p}{L_{\text{обр}}}\right|t\right) dt = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \sin c \frac{V_p}{T_0 L_{\text{обр}}} T_{\text{обр}} = \\ &= \frac{2\pi}{\rho} [I_1(\rho R_{\text{max}}) - I_1(\rho R_0)] \sin c \left(\frac{V_p}{R_{\text{max}}} T_{\text{обр}}\right). \end{aligned} \quad (1.12)$$



Отже, інженерія поверхні залежить від режимів технологічної обробки та набуває форми функцією Бесселя.

Розглянемо іншим методом загальний випадок формування поверхні деталі, коли функція враховує повністю всі відхилення від заданих технічними умовами параметрів.

Функція, яка описує шорсткість поверхні з врахуванням СМР в поперечному перерізі, можна представити випадковою гармонійною функцією з випадковими параметрами, тобто полярних координатах.

$$f(r) = 2r_n \sin \theta_n, \quad (1.13)$$

$$\text{де } r_n = \sqrt{z^2 + y^2}, \theta_n = \arctg \frac{y}{z}.$$

Величина амплітуди  $r_n$  змінюється в межах інтервалу  $[r_0, r_{\max}]$ ,  
де  $r_0$  – радіус ідеальної деталі, тобто при практично дзеркальній поверхні;

$r_{\max}$  – радіус деталі на максимальній висоті виступів шорсткої поверхні;

$\theta_n$  – кут плинної координати, під яким відбиває акустичні хвилі та неоднорідності.

Використаємо для рішення задачі теорему про середнє інтегральне обчислення, так як

$$\int_a^b f(x) dx = (b - a) f(\xi_n), \quad (1.14)$$

де  $a \leq \xi_n \leq b$ ,

$\xi_n$  – деяка точка функції  $f(x)$ .

Тоді, в нашому випадку:

$$\int_{r_0}^{r_{\max}} f(r) dr = (r_{\max} - r_0) f(\xi_n), r \leq \xi_n \leq r_{\max}, \quad (1.15)$$

$\xi_n$  – деяка точка на поверхні деталі, яка описує зміну радіусу деталі в поперечному перерізі..

При цьому  $f(\xi_n) = 2\xi_n \sin(\theta_n)$ .

В цьому випадку:

$$\int_{r_0}^{r_{\max}} 2r_n \sin \theta_n dr = (r_{\max} - r_0) * 2\xi_n \sin \theta_n. \quad (1.16)$$

Обчислимо інтеграл для першого квадранту, наприклад, в інтервалі  $[0, \frac{\pi}{2}]$

для кута  $\theta_n$ , на всю решту поверхні в межах всього периметру  $2\pi r_n$  деталі, якій визначає періодичність випадкової функції шорсткості.

Тоді

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_0}^{r_{\max}} 2r \sin \theta_n dr d\theta_n = (r_{\max}^2 - r_0^2) (-\cos \theta_n) \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = r_{\max}^2 - r_0^2. \quad (1.17)$$

$$\left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta_n d\theta_n \int_{r_0}^{r_{\max}} 2r dr = (r_{\max}^2 - r_0^2) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta_n d\theta_n \right). \quad (1.18)$$

$$r_{\max}^2 - r_0^2 = (r_{\max} - r_0) * 2\xi_n \sin \theta_n.$$

$$\xi_n = \frac{r_{\max} + r_0}{2 \sin \theta_n}.$$

Звідсіля

$$S(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_{\max} - r_0}{2 \sin \theta_n} \sin kt$$

Визначимо функцію шорсткості поверхні  $F_{\text{шф}}(r, t)$  деталі, яку оброблюють, сумою непарних гармонік ряду Фур'є:

$$F_{\text{шф}}(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kt,$$

$$\text{де } b_k = \frac{2}{T} \int_0^T F_{\text{шор}}(r, t) \sin ktdt,$$

$$T = \frac{2\pi r_3}{V_p} - \text{період обробки деталі};$$

$r_3$  – радіус заготовки;

$V_p$  – швидкість різання.

Тоді

$$\begin{aligned} b_k &= \frac{2}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^T \frac{r_{\max} + r_0}{2 \sin \theta_n} \sin ktdt = \frac{2}{T} * \frac{r_{\max} + r_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_0^T \sin ktdt = \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} * \frac{1}{k} [-\cos kT + 1] = \\ &= \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} * \frac{1}{k} * 2 \sin^2 k \frac{T}{2} = 2 \frac{r_{\max} + r_0}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} * \frac{1}{k} * 2 \sin^2 k \frac{T}{2} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Функція шорсткості визначає параметри поверхневих ефектів, що виникають внаслідок акустичних явищ та неоднорідностей, набуває форми (з врахуванням значення  $T$ ):

$$F_{\text{шф}}(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_{\max} + r_0}{2\pi r_3} * \frac{V_p}{k \sin \theta_n} \sin^2 k\pi \frac{r_3}{V_p} \sin kt. \quad (1.20)$$

Функція є залежною від нормуючих параметрів шорсткості поверхні, реальних параметрів різання.

Визначимо функцію, яка описує зміну об'єму профілю шорсткості поверхні деталі, яку отримали внаслідок токарної обробки:

$$\iint_D f(p) d\sigma = \iint_D F(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1.21)$$

де  $F(r, \varphi)$  – функція координат  $r, \varphi$ , яка представляє функцію  $f(p)$  точки Р. Вираз  $r dr d\varphi$  – елемент площі в полярних координатах.

$$\iint_D F(r, \varphi) r dr d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} F(r, \varphi) r dr, \quad (1.22)$$

де  $r_{1,2}$  – функції, які залежать від  $\varphi$ , можуть бути постійними.

Обмежимося в нашому випадку  $r \in [r_0, r_{\max}]$ ,  $\varphi \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$ .

Окружність, як наведено вище,  $f(r) = 2r_n \sin \varphi_n$ .  
Тоді

$$\begin{aligned} \iint_D 2r_n \sin \varphi_n d\sigma &= 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} \sin \varphi_n dr = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi_n d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} r^2 dr = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi_n d\varphi \cdot \frac{r_n^3}{3} \Big|_{r_0}^{r_{\max}} = \\ &= 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \cdot [-\cos \varphi_n] \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{3} (r_{\max}^3 - r_0^3). \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} d\varphi = \frac{\pi}{2}$$

$$\frac{2}{3} (r_{\max}^3 - r_0^3) = (r_{\max} - r_0) (2\pi - 0) f^2(\xi, \varphi).$$

$$\begin{aligned} r_n &= \sqrt{\frac{2(r_{\max}^3 - r_0^3)}{3(r_{\max} - r_0)2\pi4\sin^2 \varphi_n}} = \sqrt{\frac{1}{12\sin^2 \varphi_n} \cdot \frac{(r_{\max} - r_0)(r_{\max}^2 + r_0^2 + r_{\max}r_0)}{r_{\max} - r_0}} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{12\sin^2 \varphi_n} \cdot (r_{\max}^2 + r_{\max}r_0 + r_0^2)}. \end{aligned}$$

$$r_n = \frac{1}{6\pi \sin \varphi_n} (r_{\max}^2 + r_{\max}r_0 + r_0^2). \quad (1.24)$$

Площа дорівнює:

$$\begin{aligned} \Delta F &= F_{\max} - F_0 = \pi r_{\max}^2 - \pi r_0^2 = \pi (r_{\max}^2 - r_0^2). \\ \Delta F_{\sigma} &= \frac{\pi}{4} (r_{\max}^2 - r_0^2) \sin^2 \varphi_n = \frac{\pi}{4} r_n^2 \sin^2 \varphi_n. \end{aligned} \quad (1.25)$$

$$r_0 \leq r_n \leq r_{\max}.$$

Радіус випадкової функції (у полярних координатах), що описує профіль шорсткості поверхні:  $\rho = 2r_n \sin \varphi_n$ .

Площа  $\frac{1}{4}$  кільця, яке створюється поміж мінімальною та максимальною висотою шорсткості поверхні деталі, набуває форми:

$$\begin{aligned}
\Delta F_{\phi} &= \frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_{r_0}^{r_{\max}} 4r_n^2 \sin^2 \varphi dr d\varphi = \frac{1}{2} \cdot 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi d\varphi \int_{r_0}^{r_{\max}} r^2 dr = 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 - \cos 2\varphi}{2} d\varphi = \\
&= 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} \cdot \frac{1}{2} \left[ \varphi \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2} \sin 2\varphi \Big|_0^{\frac{\pi}{2}} \right] = 2 \dots \cdot \frac{1}{2} \left[ \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} (\sin \pi - \sin 0) \right] = \frac{\pi}{4} \cdot 2 \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{6} \\
&\frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3} = (r_{\max} - r_0) 4r_n^2 \sin^2 \varphi_n \\
&\frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_{\max}^3 - r_0^3}{3(r_{\max} - r_0) 4 \sin^2 \varphi_n} = r_n^2 \\
&\frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\max} - r_0)(r_{\max}^2 + r_{\max} r_0 + r_0^2)}{3(r_{\max} - r_0) 4 \sin^2 \varphi_n} = r_n^2 \\
r_n &= \sqrt{\frac{\pi}{4} \cdot \frac{(r_{\max}^2 + r_{\max} r_0 + r_0^2)}{12 \sin^2 \varphi_n}}
\end{aligned} \tag{1.26}$$

Тобто, визначаючи цю функцію, можна отримати визначення параметрів при стружкотворенні, наприклад, при токарній обробці.

### § 1.2.1.2. Моделювання параметрів поверхні після шліфувальних операцій

Розглянемо формування поверхні, яка утворюється внаслідок шліфування деталі, доводки, тощо. Така поверхня може бути описана неперіодичною функцією на кінцевому інтервалі, який визначений, наприклад, довжиною обробки деталі. Отже,  $T \neq 2\pi$ .

Використовуючи вираз (1.3) для класичного розкладу функції в ряд Фур'є.

Приведемо за допомогою заміни змінної в функції (1.3) з періодом  $2\pi$  і скористуємося виразами коефіцієнтів тригонометричного ряду (1.4).

В цьому випадку  $\frac{t}{T} = \frac{x}{2\pi}$ , звідки  $t = \frac{T}{2\pi} x$ . Тоді функція  $S(t)$ , яка визначає параметри шорсткості поверхні деталі, визначена наступним виразом:

$$S(t) = S\left(\frac{T}{2\pi} x\right) = S(x). \tag{1.27}$$

Тепер покажемо, що  $S(x)$  – періодична функція з періодом  $2\pi$ :

$$S(x + 2\pi) = S\left[\frac{T}{2\pi}(x + 2\pi)\right] = S\left(\frac{T}{2\pi} x + T\right) = S(t + T) = S(t) = S(x). \tag{1.28}$$

Отже, визначаючи коефіцієнти ряду Фур'є та виходячи з отриманих виразів, можна зробити висновок:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(x) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S\left(\frac{T}{2\pi} + x\right) dx = \left| \begin{array}{l} t = \frac{T}{2\pi} x; x = -\pi; \\ dt = \frac{T}{2\pi} dx; t = \frac{T}{2\pi}(-\pi) = -\frac{T}{2}. \end{array} \right| =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \frac{2\pi}{T} dt = \frac{1}{T/2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) dt. \quad (1.29)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(x) \cos kx dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S\left(\frac{T}{2\pi} x\right) \cos kx dx = \left| \begin{array}{l} t = \frac{T}{2\pi} x; x = -\pi; \\ dt = \frac{T}{2\pi} dx; t = \frac{T}{2\pi}(-\pi) = -\frac{T}{2}. \end{array} \right| =$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) \frac{2\pi}{T} dt = \frac{1}{T/2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \cos\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) dt. \quad (1.30)$$

Аналогічно визначаємо коефіцієнти:

$$b_k = \frac{1}{T/2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) \sin\left(k \frac{2\pi}{T} t\right) dt. \quad (1.31)$$

Якщо розглянути функцію шорсткості деталі, що формується внаслідок шліфування, полірування, або інших технологічних операцій доводки, то вона може набути форму аперіодичної функції, тобто  $b_k$  обчислюється як:

$$b_k = \frac{1}{T/2} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} F_{\phi\delta}(r, t) \sin k \frac{2\pi}{T} t dt, \quad (1.32)$$

$T$  – не є функція, яка кратна  $2\pi$ .

$$b_k = \frac{1}{T/2} \frac{r_{\max} + r_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin k \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{1}{T/2} \frac{r_{\max} + r_0}{2} * 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin k \frac{2\pi}{T} t dt =$$

$$= \frac{r_{\max} + r_0}{T} * 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\sin \theta_n} \frac{T}{2\pi k} \left[ -\cos k \frac{2\pi}{T} * \frac{T}{2} + 1 \right] = 2(r_{\max} + r_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi \sin \theta_n} \sin^2 k \frac{\pi}{2}$$

А функція, яка описує поверхневі ефекти при цьому типі технологічної обробки, набуває форми

$$F_{\text{шф}}(r, t) = 2(r_{\max} + r_0) \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\pi \sin \theta_n} \sin^2 k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{2\pi}{T}, \quad (1.34)$$

Тобто функція визначає також нормові параметри шорсткості та залежить від режимів обробки.

### **§ 1.3. Класифікація і призначення оптичних контрольно-вимірювальних приладів**

Багато вимірювань, що здійснюються при контролюванні виробів, відносяться до лінійних та кутових. Значна частина цих вимірювань виконується за допомогою оптичних приладів.

Оптична система приладу будь-якого типу являє собою сукупність оптичних вузлів і деталей (лінз, призм, дзеркал, об'єктивів, окулярів тощо). Основне призначення оптичної системи контрольно-вимірювального приладу полягає у формуванні пучків світлових променів для подальшої їх обробки щодо вимірювання геометричного параметру об'єкта, наприклад прецизійної деталі.

Для цього у вимірювальних приладах використовуються основні властивості оптичних систем:

- 1) можливість отримувати дійсні та уявні збільшені зображення шкал приладів або об'єктів вимірювання за допомогою лінз;
- 2) пропорційність кутів повороту дзеркал і відбитих від нього променів;
- 3) дисперсія світла;
- 4) інтерференція тощо.

Здебільшого усі типи оптичних контрольно-вимірювальних приладів можна поділити на оптико-механічні та оптико-електронні прилади (рис. 1.6).

Оптико-механічні прилади призначені для високоточних вимірювань розмірів виробів і відхилень від їх геометричних розмірів, зокрема форми. Оптико-механічні прилади мають оптичні та механічні вимірювальні системи.

Оптико-механічні прилади є різноманітними за призначенням і засадами дії оптичної та механічної вимірювальних систем. До них відносяться оптикатори, оптиметри, довжиноміри, вимірювальні машини, інтерферометри, вимірювальні мікроскопи різних типів й проектори.

Оптико-електронні прилади у своєму складі містять електронні модулі реєстрації, обробки оптичного зображення, блоки формування режимів дії джерела випромінювання, а також іноді містять блоки зворотнього зв'язку з об'єктом контролю для здійснення динамічного режиму контролю та діагностики плинного стану, здебільшого при механічній обробці металів, як буде показано на прикладах авторських розробок систем контролю та діагностики. Подібні оптико-електронні системи є повністю автоматизованими, які дозволяють роботу в складі гнучких виробничих систем промислового виробництва.

Застосування оптико-електронних приладів дозволяє виконувати високоефективні безконтактні вимірювання та знижують похибки, що характерні для традиційної вимірювальної техніки. Вибір джерела випромінювання є важливою складовою специфіки функціонування контрольно-вимірювального приладу.

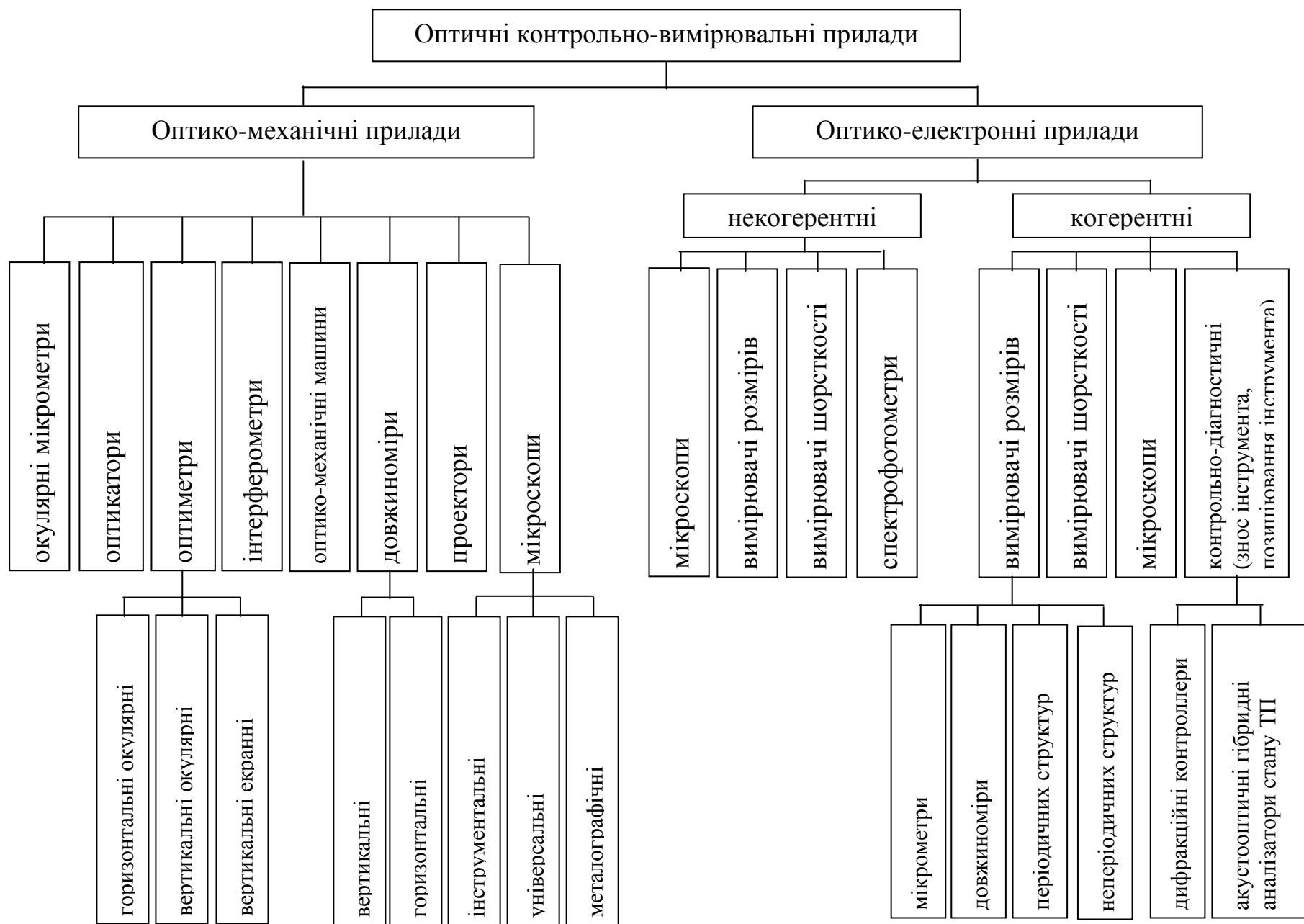


Рис. 1.6. Класифікація оптичних приладів контролю та вимірювання розмірів деталей при механічній обробці



Особливе місце серед оптико-електронних приладів займають вимірювачі, які використовують лазерні випромінювачі, що має значні переваги при застосуванні.

Лазерна техніка і лазерні контрольно-вимірювальні технології наразі є невід'ємною частиною сучасних систем і устаткування для різних сфер науки і техніки: авіаційної та аерокосмічної техніки, обчислювальної техніки, оптичних телекомунікаційних засобів, точного приладобудування і машинобудування, технологічних процесів обробки матеріалів, екологічного моніторингу навколишнього середовища тощо. Тому у сучасне промислове виробництво, яке впроваджує новітні технологічні процеси виготовлення надточних деталей, доцільним є застосування автоматизованих систем контролю та діагностики на засадах лазерних технологій.

Використання лазерних систем - це електронна альтернатива людському чиннику на операціях візуального або ручного контролю якості, тобто проведення автоматизації технічних вимірювань, контролю та діагностики стану технологічних процесів виготовлення надточних деталей, зокрема при механічній обробці металів. Це дозволяє запобігати суб'єктивним результатам контролю та вимірювань, збільшити продуктивність промислового виробництва і знизити витрати завдяки контролю якості кожної одиниці продукції.

Системи безконтактного контролю на сьогодні є одними з ключових елементів при рішенні задачі забезпечення якості продукції. Висновок про придатність/непридатність виробу і формування відповідних сигналів, що керують, на устаткування і на верхній рівень (MES, ERP), проводиться автоматично, тим самим виключається "людський чинник" оператора виробництва при контролі якості деталі або виробу після механічної обробки. За допомогою цих систем надійно вирішуються завдання ідентифікації і пошуку дефектів виробу, контролю його геометричних розмірів і форми, точності і якості складання, а також відхилення цих і інших параметрів від допустимого значення. При цьому точність контролю і вимірювань значно вище чим при виконанні цих же операцій вручну.

Останнім часом все більше використання в процесах проектування, створення і контролю техніки і приладів знаходять системи безконтактних вимірювань, що ґрунтуються на різноманітних фізичних принципах. Серед них значне місце займають системи лазерної триангуляції, лазерної дальнометрії тощо.

Рішення на базі лазерної далекометрії і скануючих мікрометрів дозволяють проводити високоточні безконтактні вимірювання. Спектр вирішуваних завдань містить як вимірювання простих геометричних параметрів (діаметр, довжина, висота об'єкту), так і деталей складної форми. Для забезпечення автоматизації оптико-електронних приладів при застосуванні їх у промисловому контролі можлива повне оцифрування поверхні об'єкту для

подальшого порівняння з еталонною математичною моделлю або для інженерного аналізу тощо.

Можна визначити такі види прецизійних вимірювань, які необхідні при виготовленні деталей механічною обробкою: вимірювання розмірів і форми, вимірювання товщини, об'єму, контроль положення об'єкта.

Основні засади роботи оптичних відчутників контрольно-вимірювальних приладів для застосування у механічній обробці матеріалів полягають у наступному.

1. *Радарний принцип*, заснований на вимірюванні часу проходження коротких імпульсів світлового (лазерного) випромінювання. Об'єкт контролю (або вимірювання) відбиває ці світлові імпульси назад у фотоприймальний блок. Надалі зареєстровані сигнали надходять у електронний модуль обробки сигналів, де формується величина відстані до об'єкта. Тобто, коли світловий імпульс посиляється, електронний таймер починає відлік, який зупиняється, коли світловий імпульс повертається в приймач. Цей принцип надзвичайно нечутливий до навколишнього світла. Відчутники радарного типу можуть вимірювати великі відстані, проте принцип їх роботи, заснований на вимірюванні часу розповсюдження світла від датчика до об'єкта і назад, дозволяє вимірювати з обмеженим розширенням в 2 – 3 мм.

2. *Триангуляція*. При цьому оцінюється кут променя світла, що повернулося. Випромінювання надходить до поверхні об'єкта, який відбиває світло назад, де він проходить через лінзу і потрапляє на фотоелемент. Електронний модуль визначає точку найбільшої інтенсивності, кут і відстань (рис. 1.7).

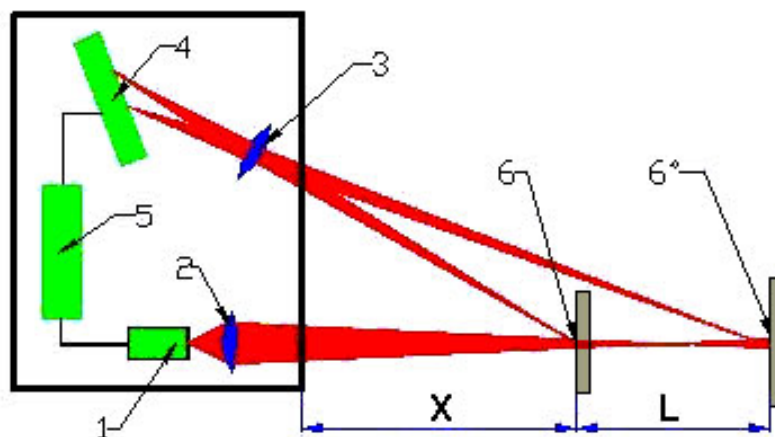


Рис. 1.7. Триангуляційний принцип оптичного вимірювання позиціонування об'єкта

Випромінювання лазерного випромінювача 1 фокусується оптичною системою

2 на об'єкті 6 контролю. Розсіяне на об'єкті випромінювання об'єктивом 3 збирається на фоточутливій площинці приймача 4. Процесор 5 на підставі обробки інформаційних сигналів від приймача 4 розраховує відстань до об'єкту по положенню зображення світлової плями на площинці фотоприймача 4.

Переважає більшість завдань по вимірюванню розмірів у приладобудівній промисловості доводяться на діапазони від долей мікрометра до декількох десятків метрів. При цьому датчики повинні працювати з об'єктами малого розміру, далекими від ідеальних, що мають різний колір, складну структуру поверхні, а також які переміщуються з високою швидкістю. Для таких задач найбільш підходять лазерні чутники відстані, що працюють за принципом оптичної тріангуляції.

3. *Інтерферометрія.* Принцип інтерферометрії широко застосований у приладобудівній промисловості при контролі формотворення, вимірюванні геометричних розмірів деталі, відхилень від заданого розміру тощо. Перспективним напрямом контрольно-вимірювальної техніки це є для застосування при виготовленні оптичних, металевих деталей з дуже високими вимогами щодо їх геометричних розмірів, якості поверхні. Лазерні інтерферометри, наприклад, мають великий діапазон вимірювань і точність декілька нанометрів, проте, ці прилади і досі дуже дорогі та складні в експлуатації на промисловому виробництві.

4. *Дифрактометрія.* Для контролю розмірів малих об'єктів при виготовленні деталей у надточному приладобудуванні використані можливості явища дифракції світлових хвиль.

Цей метод застосовано для контролю, наприклад, періодичних структур надточних деталей. Запропоновано авторські розробки [1.8] застосування цих явищ для побудови дифракційних контролерів зносу різального інструмента при токарній обробці, позиціонування токарного різального інструмента, що значно підвищує точність виготовлення надточних деталей на токарних верстатах з ЧПК.

5. *Гібридні методи.* Перспективними для впровадження у сучасне приладобудівне виробництво є запропоновані авторські розробки [1.13 – 1.16] щодо гібридних лазерних аналізаторів динаміки процесу різання на верстатах з ЧПК. Основні засади роботи цих автоматизованих спектрально-кореляційних систем полягають у акустооптичних методах обробки сигналів вібрації об'єктів технологічного процесу, електромагнітних процесів, які виникають в зоні різання при торканні різального інструмента маси деталі.

Завдяки застосуванню гібридних методів обробки сигналів від працюючого технологічного обладнання підвищується точність та надійність визначення зносу різального інструмента, порушення нормального ходу технологічного процесу.

Тому для порівняння існуючих оптичних контрольно-вимірювальних приладів та систем доцільно розглянути основні засади дії найбільш поширених наразі приладів.

#### § 1.4. Засади оптичних вимірювань механічних величин у точному приладобудуванні

З огляду на теорію фізичної оптики, видимим світлом є електромагнітне випромінювання у діапазоні довжин хвиль від  $\lambda = 0,38$  мкм до  $\lambda = 0,78$  мкм.

Швидкість світла залежить від середовища, в якому розповсюджується.

Показник заломлення характеризує оптичні властивості середовища і визначається виразом  $n = \frac{C}{C_{\text{сер}}}$ , де  $C$  — швидкість світла в вакуумі;  $C_{\text{сер}}$  —

швидкість світла в певному середовищі. Він залежить від довжини хвилі світла: чим більше довжина хвилі, тим менше показник заломлення. Це явище має назву дисперсії світла і використовується для розкладання світла, наприклад, за допомогою призми.

З огляду на засади геометричної оптики джерелом світла є крапка, промінь світла — лінія, по якій розповсюджується світло, світловий потік — сукупність світлових променів.

У однорідному прозорому середовищі світло розповсюджується від джерела прямолінійно на всі боки з однаковою швидкістю. Світлові промені в пучку не впливають один на іншій. Кут віддзеркалення променя від поверхні рівний куту падіння, а кут  $\alpha$  падіння і кут  $\alpha'$  заломлення на межі двох середовищ зв'язані залежністю  $n \sin \alpha \approx n' \sin \alpha'$ .

Оптичні прилади для формування оптичного зображення містять дзеркала, лінзи та інші оптичні елементи. Для отримання якісного зображення зазвичай використовуються системи лінз. Об'єктив є системою лінз та дзеркал, що розташована з боку об'єкту вимірювання і дає його первинне зображення. Окуляр є системою лінз, що звернена або до ока спостерігача, або до блоку реєстрації зображення (фотоприймач).

В оптичних приладах досить часто застосовується оптичний важіль.

Принцип дії оптичного важеля, отриманого за допомогою дзеркала, показаний на рис. 1.8. На дзеркало 1 падає промінь світла 2 і відбивається на шкалу 3 приладу. Якщо дзеркало нахилити на кут  $\alpha$ , то відбитий промінь зміститься на відстань  $l$  —  $2aL$ , де  $L$  — відстань шкали від дзеркала.

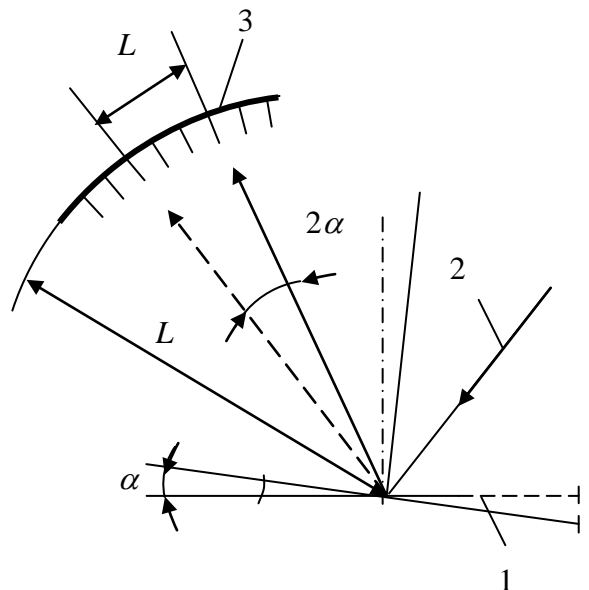


Рис. 1.8. Схема оптичного важеля

Завдяки багатократному віддзеркаленню променя світла між дзеркалами, що повертаються, та нерухомим, розмір оптичного важеля може бути збільшений.

Оптичний важіль можна отримати також за допомогою об'єктиву і дзеркала. Об'єктив перетворює розсіяне світло від джерела, розташованого на фокальній поверхні  $MN$  об'єктиву, наприклад у крапці  $A$ , в пучок паралельних променів і збирає падаючі на нього паралельні промені на фокальній площині в крапці  $B$  (рис. 1.9,а).

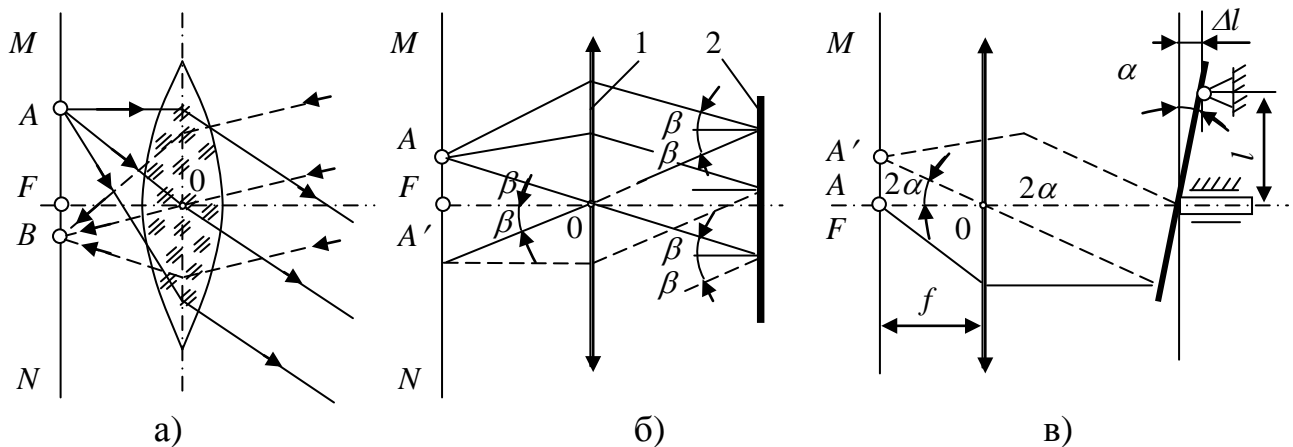


Рис. 1.9. Схеми автоколімації при різних положеннях джерела світла, об'єктиву і дзеркала

Фокальною площиною об'єктиву є площина, яка проходить через його фокус  $F$  перпендикулярно до головної оптичної осі  $OF$ . Напрямок паралельних променів після об'єктиву співпадає з напрямком оптичної осі  $AO$ , оскільки промені, що проходять через оптичний центр об'єктиву  $O$ , не заломлюються. Відповідно, крапка  $B$  розташована на перетині променів  $O$ , що йде через оптичний центр, з фокальною площиною  $MN$ . Якщо джерело світла помістити в крапку  $A$  у фокальній площині, а за об'єктивом поставити дзеркало (рис. 1.9, б, в), то промені, які відбиті від дзеркала і пройшли знову через об'єктив, зберуться в крапці  $A'$  у фокальній площині. Крапка  $A'$  є зображенням автоколімації точки  $A$ , оскільки ці крапки знаходяться в одній площині.

Оптичні прилади, що призначені для отримання зображення автоколімації об'єкту, мають назву автоколіматорів.

Можливі два випадки автоколімації.

1. Джерело світла  $A$  є розташованим на відстані  $AF$  від головної оптичної осі об'єктиву  $1$ , а площина дзеркала  $2$  перпендикулярна до головної оптичної осі (рис. 1.9,б). Автоколімаційне зображення  $A'$  розташовується симетрично крапці  $A$  відносно фокусу  $F$ . Оскільки кут відбиття променів від дзеркала є рівним куту падіння  $\beta$ , то  $\angle AOF = \angle A'OF$ . З рівності

прямокутних трикутників  $AOF = A'OF$  впливає рівність  $A'F = AF$ .

2. Джерело світла  $A$  розташований у фокусі  $F$  об'єктиву, а дзеркало нахилене до головної оптичної осі під кутом  $\alpha$  (рис. 1.9, в). При цьому кут відбитих від променів з головною оптичною віссю є рівним  $2\alpha$ .

Відхилення зображення автоколімації  $A'$  від крапки  $A$

$$AA' = f \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (1.35)$$

де  $f$  — фокусна відстань об'єктиву.

В оптиметрах поворот дзеркала відбувається під дією вимірювального стрижня приладу. Переміщення  $\Delta l$  стрижня, плече механічного важеля, що повертає дзеркало, і кут повороту зв'язані співвідношенням  $\Delta l = l \operatorname{tg} \alpha$ .

Передатне відношення оптичної системи автоколімації

$$S = \frac{AA'}{\Delta l} = \frac{f \cdot \operatorname{tg} 2\alpha}{l \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (1.36)$$

і не залежить від відстані між дзеркалом і об'єктивом.

При малих кутах повороту дзеркала, близьких до нуля

$$\operatorname{tg} \alpha = \alpha; \operatorname{tg} 2\alpha = 2\alpha; S = \frac{2f}{l}. \quad (1.37)$$

Фотоелектричні і телевізійні методи, які застосовані при контрольно-вимірювальних операціях у виробництві, мають низку недоліків, обумовлених складністю їх автоматизації. Дійсно, у міру зменшення розмірів елементів і зростання вимог до точності вимірювань виникають труднощі, пов'язані з необхідністю підвищення якості зображення оптичних систем, що відображають вимірюваний об'єкт.

Підвищення роздільної здатності мікрооб'єктивів зв'язано, зокрема, із збільшенням апертури. Це призводить до зменшення глибини різкості  $\Delta z \approx \lambda / A^2$ , що при недостатньо точному визначенні положення точки  $I_0$  на кривій розподілу інтенсивності в зображенні краю елементу, у свою чергу, призводить до додаткових помилок наведення і зниження точності фотоелектричних вимірювань малих розмірів, особливо за наявності ступінчастих структур.

Більшість фотоелектричних приладів забезпечують достатньо високу точність вимірювань елементів розміром від 1 до 1,5 мкм; при менших розмірах виникають труднощі точного визначення точки  $I_0$ , пов'язані з отриманням якісного зображення дрібних елементів через впливу великого числа чинників: аберації, ступеня когерентності освітлення, фазових зсувів тощо.

Ще більші труднощі виникають при фотоелектричних вимірюваннях об'єктів низького контрасту з невизначеною формою країв, у яких погана якість зображення не дозволяє реалізувати можливості фотоелектричного методу.

При фотоелектричних вимірюваннях пред'являються підвищені вимоги до точності вимірювальної системи в цілому і особливо до оптико-механічної скануючої частини приладів, яка забезпечує послідовне сканування країв зображення елементів.

Врешті фотоелектричні прилади зі зменшенням вимірюваних розмірів значно ускладнюються, надійність роботи знижується, спостерігається нестабільність результатів вимірювань у часі.

Важливо також, що вартість цих приладів є високою, і що з урахуванням складності автоматизації дуже складно вбудовувати їх в технологічні лінії. Тому у виробничому контролі часто повертаються до використання простіших візуальних приладів, що задовольняє таким вимогам, як об'єктивність, точність, продуктивність.

Вказані недоліки значною мірою усувають дифракційні методи вимірювань [1.17, 1.18]. Ці методи доцільно використовувати для прямих вимірів геометричних розмірів надточних деталей, а також і для контролю позиціонування різального інструмента на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) та для контролю зносу різальної крайки токарного інструмента, як буде показано далі.

#### **§ 1.4.1. Дифракційні явища в оптичних контрольно-вимірювальних приладах**

На відміну від фотоелектричного методу, в дифракційному методі розподіл інтенсивності вимірюється не в площині зображення елементу, а в його Фур'є-спектрі. Тому дифракційний метод вимірювань лінійних розмірів не пов'язаний з формуванням зображень елементів і, отже, в значній мірі вільний від похибок, що визначаються якістю оптичної системи. При цьому, на відміну від інших методів, із зменшенням розмірів елементів точність дифракційного методу збільшується, оскільки при цьому зростають кути дифракції, в наслідок чого в площині вимірювань є деякий розподіл інтенсивності, просторові розміри якого перевищують розміри вимірюваного елементу в десятки і сотні тисяч разів.

Дифракційні явища, фізично обмежуючи граничні можливості оптичних методів, в той же час можуть бути використані для проведення найбільш точних вимірювань лінійних розмірів елементів.

Якісно новий стрибок в розвитку дифракційних вимірювань відбувається наразі, коли на зміну реєструючим аналоговим пристроям обробки дифракційної картини з'явилися системи з координатно-чутливими фотоприймачами і мікропроцесорними системами обробки і керування процесами вимірювань.

Для контролю лінійних розмірів елементів здебільшого можливе використання трьох різновидів дифракційного методу вимірювань:

1. Контроль лінійного розміру одиничного елементу при реєстрації інтенсивності у фіксованих точках дифракційної картини (наприклад, в точках *A* і *B* на Рис. 1.10).

2. Вимірювання лінійного розміру одиночного елементу внаслідок реєстрації відстані між екстремальними крапками дифракційної картини (наприклад, відстані  $x_{11}$  між однойменними мінімумами).



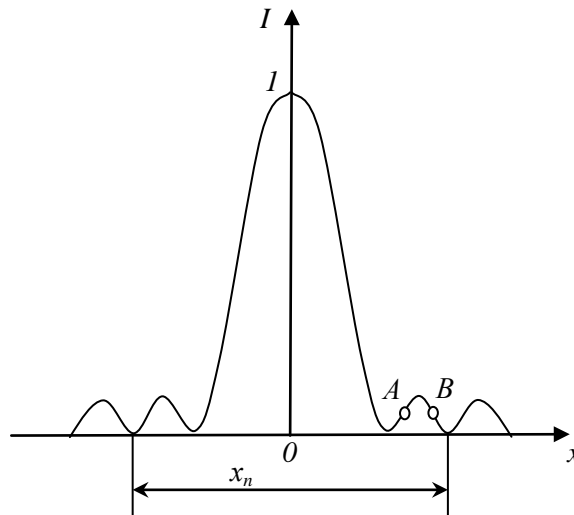


Рис. 1.10. Розподіл інтенсивності по одній з ортогональних осей при дифракції на прямокутному елементі

3. Вимірювання лінійних розмірів в групі періодичних елементів (штрихів дифракційної ґратки) при реєстрації співвідношення інтенсивності світла у різних дифракційних максимумах.

Перші два методи достатньо широко використовувалися і раніше для вимірювання діаметру тонких волокон, ниток і малих зазорів. Аналіз цих методів, проведений в [1.18], показує, що чутливість (залежність інтенсивності від зміни розміру) першого методу зменшується із зменшенням вимірюваного розміру, а також у міру видалення крапок реєстрації інтенсивності від центрального максимуму дифракційної картини. Крім того, чутливість залежить від потужності джерела випромінювання, а результати вимірювань від просторового розташування вимірюваного об'єкту щодо поперечного перетину лазерного пучка. Все це є недоліком першого методу, що утруднює його використання для вимірювання малих об'єктів, вимагає стабілізації лазерного випромінювання, а також і точної орієнтації вимірюваного об'єкту.

Другий метод, що використовує для вимірювань характеристичних розмірів дифракційного розподілу (лінійні або кутові), вигідно відрізняється від попереднього: чутливість (залежність характеристичного розміру від вимірюваного розміру) росте із зменшенням вимірюваного розміру. Вона не залежить від інтенсивності випромінювання. Точна орієнтація вимірюваного об'єкту відносно освітлюючого пучка не потрібна. Враховуючи переваги і перспективність цього методу для прецизійних автоматичних вимірювань елементів в мікроелектроніці, розглянемо його докладніше.

Згідно принципу Гюйгенса–Френеля, кожна точку об'єкту, що опромінюється зовнішнім джерелом, слід вважати центром вторинного збурення, випромінюючого елементарні сферичні хвилі. Хвильовий фронт, що

йде від поверхні об'єкту, є таким, що огинає ці елементарні хвилі. Така модель зручна для математичного опису, проте має недостатньо реальний фізичний сенс, особливо, якщо об'єктом служать розриви в матеріальному середовищі. Більш фізичний підхід полягає в тому, що поле в площині спостереження розглядається як суперпозиція падаючої (випадок отвору) або відбитої хвилі (непрозорий об'єкт) і дифрагованих хвиль, джерелами яких служать крайки об'єкту. Проте при такій моделі чітке рішення дифракційної задачі, що базується на системі рівнянь Максвелла, виявляється надзвичайно складним. З цієї причини доцільним є застосування наближених методів рішення, відомих під загальною назвою геометричної теорії дифракції [1.19, 1.20].

Ці методи засновані на узагальненні законів геометричної оптики з одночасним застосуванням елементів хвильової теорії розповсюдження світлових коливань. Слід відзначити, що геометрична теорія дифракції дає досить громіздкі вирази, що утруднюють їх практичне застосування.

Скористаємося елементами геометричної теорії дифракції при теоретичному розгляді дифракції на об'ємних тілах. Цікавим питанням є контроль якості виготовлення деталей для мікроелектронних приладів і механообробкою, та іншими методами. Якщо ж об'єктом дифракції є поодинокий топологічний елемент, наприклад фотошаблону схеми мікроелектроніки, то, з урахуванням того, що товщина маскуючого покриття на фотошаблоні істотно менша довжини хвилі  $\lambda$  зонduючого світлового випромінювання, задача зводиться до описаного в теорії випадку отвору в нескінченно тонкому непрозорому екрані, для якого застосовні положення скалярної теорії дифракції, що базуються на принципі Гюйгенса-Френеля.

Розглянемо стисло рішення дифракційної задачі для отвору прямокутної форми площею  $S_1$ , що опромінюється плоскою хвилею. Для простоти припустимо, що площина спостереження паралельна площині об'єкту. Відстань між обома площинами задамо рівною  $z$  (рис. 1.11).

Амплітуда поля в точці  $(x_0, y_0)$ , згідно математичному виразу принципу Гюйгенса-Френеля, визначається таким чином:

$$U(x_0, y_0) = \iint_{S_1} \frac{1}{j\lambda} \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(n; r_{01}) U(x_1; y_1) dx_1 dy_1 \quad (1.38)$$

де  $U(x_1; y_1)$  – розподілення амплітуди в площині отвору;

$k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число.

Виражаючи модуль вектора  $r_0$  і через відстань  $z$  і значення координат крапок  $p_1$  і  $p_0$ , з урахуванням апроксимації отриманого виразу першими двома членами розкладання квадратного кореня  $\sqrt{1+b} = 1 + (1/2)b - (1/8)b^2 + \dots$ ,  $|b| < 1$  отримуємо вираз (1.38) в наступному вигляді:

$$U(p_0) = \iint_{S_1} U(x_1; y_1) \frac{\exp(jkr_{01})}{r_{01}} \cos(n; r_{01}) \exp\left\{j \frac{k}{2z} \left[ (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 \right]\right\} dx_1 dy_1 \quad (1.39)$$

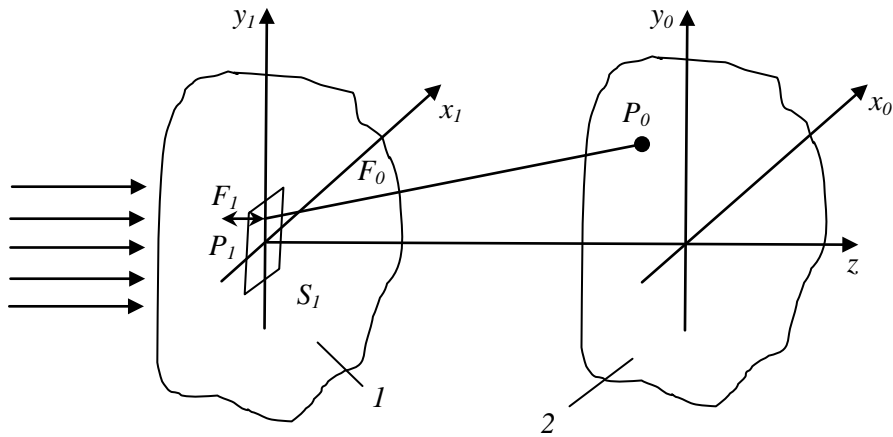


Рис. 1.11. До розрахунку дифракції на прямокутному отворі: 1 – площина об'єкту; 2 – площина спостереження

Перетворюючи квадратні члени в експоненті і припускаючи, що  $z \gg \frac{k(x_1^2 + y_1^2)_{\max}}{2}$ , прийдемо до виразу збурення в довільній площині спостереження для області Фраунгофера

$$U(p_0) = \left\{ \exp(jkz) \exp \left\{ \frac{j \frac{k}{2z} [x_0 - x_1]^2}{j\lambda z} \right\} \right\} \cos(n; r_{01}) \times \iint_{S_1} U(x_1; y_1) \left\{ \frac{-j \frac{k}{2z} [x_0 - x_1]^2}{j\lambda z} \right\} dx_1 dy_1 \quad (1.40)$$

Якщо припустити, що за межами отвору  $S_1$  функція  $U(x_1; y_1)$  тотожно рівна нулю, то можна замінити межі інтеграції в останньому співмножнику виразу (1.40) на нескінченності. В цьому випадку вказаним співмножником є Фур'є-образ функції  $U(x_i; y_i)$  розподілу поля в отворі, обчислений для частот  $f_x = x_0/\lambda z, f_y = y_0/\lambda z$ .

Припустимо, що розподіл амплітуди поля в отворі співпадає з точністю до постійного множника з коефіцієнтом пропускання  $\tau$ :

$$\begin{aligned} \tau(x_1; y_1) &= \frac{1}{l_x l_y} \text{Rect}(x_1 / l_x) \text{Rect}(y_1 / l_y) = \\ &= \begin{cases} 1 / l_x l_y & \text{при } |x| < l_x / 2 \quad |y| < l_y / 2 \\ 0 & \text{при всіх інших других } x \text{ та } y \end{cases} \end{aligned} \quad (1.41)$$

де  $l_x$  та  $l_y$  – розмір отвору відповідно по осі  $x_I$  та  $y_I$ .

Фур'є-образ такої функції визначається виразом:

$$g(f_x, f_y) = \frac{\sin(\pi l_x f_x)}{\pi l_x f_x} \cdot \frac{\sin(\pi l_y f_y)}{\pi l_y f_y} \quad (1.42.)$$

Зводячи (1.40) в квадрат з врахуванням (1.42) і усереднюючи отриманий вираз по нескінченному проміжку часу, прийдемо до відомого розподілу інтенсивності оптичного сигналу в площині спостереження при дифракції Фраунгофера на прямокутному отворі:

$$I(x_0, y_0) = \frac{l_x^2 l_y^2}{\lambda^2 z^2} \sin^2 c^2 \frac{l_x x_0}{\lambda z} \cdot \sin^2 c^2 \frac{l_y y_0}{\lambda z} \quad (1.43)$$

Аналіз виразу (1.43) вказує на однозначний зв'язок між періодам коливань функції просторового розподілу інтенсивності оптичного сигналу і лінійним розміром отвору для кожної з двох осей координат.

Отже, при вимірюваннях розмірів елементів з малою глибиною рельєфу  $d \ll \lambda$  можна чекати виконання закону зворотної пропорційності між кроком дифракційної картини і розміром топологічного елементу для заданої площини за умови, що фронт зондуючого пучка є плоским, а вимірюваний розмір істотно більш ніж  $K$ .

Розглянемо далі особливості дифракції на об'ємних об'єктах. Такими об'єктами є ступінчасті структури надточних деталей. До теперішнього часу не існує добре розробленої теорії дифракції для об'ємних тіл. Деякі прості об'ємні конфігурації допускають розрахунок дифракційних картин Фраунгофера по формулах теорії лінійних оптичних систем, проте результати розрахунків здебільшого в аналітичному вигляді не представлені, що у значній мірі ускладнює їх практичне застосування.

У [1.21] розглянутий оптико-геометричний метод розрахунку дифракції Фраунгофера для деяких об'ємних тіл, що дозволяє на якісному рівні оцінити характер розподілу інтенсивності в дифракційній картині за низкою спрощуючих припущень. Зокрема, розглянуті випадки об'ємного краю з обмежуючою апертурою і біпланарна щілина (рис. 1.12, а, б), які виконані з абсолютно поглинаючого матеріалу.

В обох випадках амплітуда поля в деякій точці  $x_0$ , що розташоване на площині  $P_0$ , паралельній передній  $P$  і задній напівплощині  $P_1$ , що створює об'ємну щілину, визначається оптико-геометричним методом у межах скалярної теорії дифракції:

$$U(x_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g\left(x + \frac{x_0 d}{2z}\right) e^{-j2\pi x_0 x / \lambda z} dz \quad (1.44)$$

де  $f(x)$  – функція пропускання щілини на рівні  $P$ ;

$g(x + x_0 d / 2z)$  – приведена до площини  $P$  функція пропускання щілини на рівні  $P_1$  із зміненим значенням ширини  $a$  на  $a/2$ .

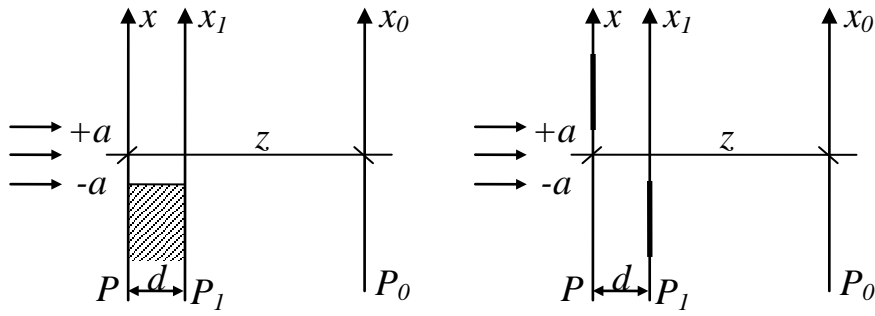


Рис. 1.12. Об'ємний край з обмежуючою апертурою (а) і біпланарна щілина (б)

Обчислення поля в площині спостереження  $P_0$  для об'єкту, зображеного на рис. 1.12,а, надає:

$$U(x_0) = \begin{cases} \sin(2\pi x_0 a / \lambda z) / x_0 & \text{ї дè } x_0 > 0; \\ e^{j2\pi x_0^2 d / 4\lambda z^2} \sin\left[\frac{2\pi x_0 a}{\lambda z} \left(1 + \frac{x_0 d}{4za}\right)\right] / x_0 & \text{ї дè } x_0^{o\partial c} < x_0 < 0; \\ 0 & \text{ї дè } x_0 < -x_0^{o\partial c}. \end{cases} \quad (1.45)$$

$$U(x_0) = \begin{cases} \sin(2\pi x_0 a / \lambda z) / x_0 & \text{ї дè } x_0 > 0; \\ e^{j2\pi x_0^2 d / 4\lambda z^2} \sin\left[\frac{2\pi x_0 a}{\lambda z} \left(1 + \frac{x_0 d}{4za}\right)\right] / x_0 & \text{ї дè } x_0 > x_0^{o\partial c} \\ 0 & \text{ї дè } x_0 < -x_0^{o\partial c}. \end{cases} \quad (1.46)$$

де  $x_0^{o\partial c} = 2az/d$  – частота відсічки, обумовлена апертурним обмеженням.

Для об'єкту, зображеного на рис. 1.12,б, рішення має вигляд: просторових частот об'ємною щілиною.

Якщо підставити в отримані формули значення  $d = 0$ , то прийдемо до відомого виразу для плоскої щілини:

$$U(x_0) = \sin(2\pi x_0 a / \lambda z) / x_0 \quad (1.47)$$

З (1.45) і (1.46) випливає, що об'ємність призводить до появи фазового і зміни амплітудного компоненту спектру.

Разом з лінійним членом по  $x_0$ , аргумент амплітудного компоненту містить квадратичний член, що призводить до збільшення частоти коливань  $U(x_0)$  при зростанні  $x_0$ . Неважко показати, що положення нулів у спектрі (1.46) підкоряється виразу:

$$x_0(k)_{U=0} = 2az \left( \sqrt{1 + (dk\lambda / 2a^2)} - 1 \right) / d \quad (1.48)$$

де  $k$  – порядковий номер мінімуму.

Якщо обчислити межу функції (1.48) при  $d \rightarrow 0$ , то прийдемо до умови еквидискантного проходження нулів, яке також може бути отримано з розглянутих вище виразів (1.43) і (1.47) для плоскої щілини:

$$x_0(k)_{U=0} = k\lambda z / 2a \quad (1.49)$$

Порівнюючи (1.48) і (1.49) і виключаючи відстань  $z$ , розрахуємо залежність відносного відхилення положення першого, другого і третього нулів дифракційного спектру біпланарної щілини, від положення нулів ідеальної плоскої щілини.

На рис. 1.13 приведений результат розрахунку для двох розмірів щілини: 1 і 3 мкм при товщині від 0 до 1 мкм. Не дивлячись на віддаленість розглянутих моделей від реального елементу надточної деталі, в цілому можна чекати дотримання основних закономірностей, характерних для біпланарної щілини; нулі дифракційного спектру об'ємної щілини не еквидистантні. Їх положення відхиляються від нулів дифракційного спектру плоскої щілини тим сильніше, чим більше відношення товщини щілини до її ширини. Ширина центрального максимуму дифракційного спектру в найменшій мірі схильна до впливу об'ємності об'єкту. Збільшення товщини об'ємної щілини призводить до стиснення дифракційного спектру.

З рис. 1.13 випливає, що нехтувати рельєфністю реальних об'єктів можна при відносінах ширини вимірюваного елементу до товщини більше 10—20. У решті випадків необхідно вводити відповідні поправки або атестувати дифракційний вимірювач по реальних еталонах. Через монотонний характер приведених залежностей число еталонних структур може бути невеликим.

Вплив форми краю щілинного об'ємного об'єкту на характер розподілу інтенсивності в дифракційному спектрі розглядався в [1.22]. При цьому передбачалося, що віддзеркалення від країв відсутні, а амплітуда сферичних хвиль від країв щілини пропорційна коефіцієнту пропускання краю. Для даної моделі було показано, що в міру збільшення «м'якості» країв відбувається зменшення амплітуди і частоти дифракційних осциляцій. Найбільше придушення дифракції спостерігалось при експоненціальному ході коефіцієнта пропускання краю, тобто, коли просторовий інтервал від мінімального до максимального пропускання є нескінченним.

У реальних умовах неможна показати таку форму краю, тому амплітуда осциляції інтенсивності завжди залишається вищою 1% від інтенсивності в центральному максимумі. При цьому частота осциляції не опускається нижче за значення, рівне 0,45 від частоти коливань властивих «жорсткій» діафрагмі.

Отже, для точного вимірювання лінійних розмірів топологічних елементів, що мають певний рельєфом, необхідно отримувати інформацію не тільки про крок дифракційної картини, але і характер зміни амплітуд окремих її максимумів.

Дифракційні методи доцільно застосовувати при контролі цілої низки типів надточних деталей приладів, виготовлених механічною обробкою або тих

типів шаблонів, які у подальшому будуть застосованими при серійному виготовленні деталей.

Технічна реалізація дифракційного методу вимірювань елементів надточних структур може бути здійснена у світлі, що проходить, або у відбитому (для планарних структур та інших об'єктів).

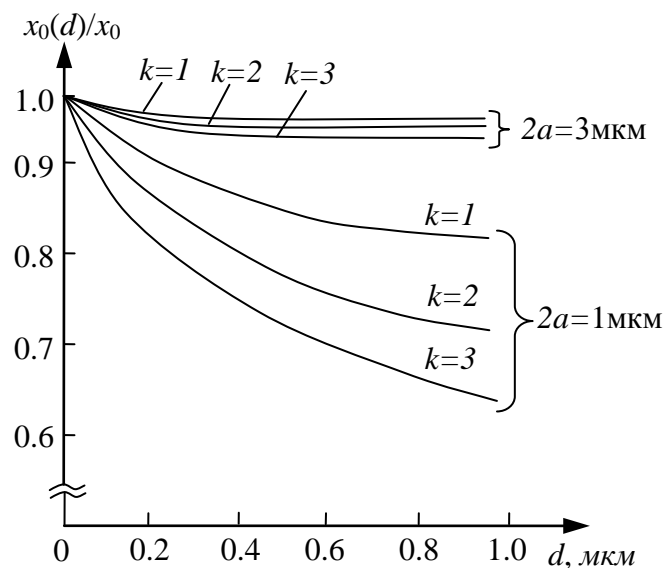


Рис. 1.13. Відносне відхилення координат перших мінімумів дифракційного спектру об'ємного тіла типу біпланарної щілини від положення відповідних нулів в спектрі плоскої щілини ( $k$  – порядок мінімумів)

Оптична схема дифракційного вимірювача лінійних розмірів готових деталей, які розташовані при технічному контролі на прозорій підкладці, представлена на рис. 1.14. Форма розподілу інтенсивності в дифракційному спектрі, що виникає при падінні плоскої хвилі на об'єкт типу щілини в деталі, має вигляд, представлений на рис.1.10. Даний розподіл реєструється фотоприймачем, що розташований під об'єктом.

Такі системи прості за конструкцією, малочутливі до неточностей установки відстані *об'єкти-вимірюваний об'єкт*, але на результати вимірювань впливають товщина і показник заломлення підкладки. У зв'язку з цим доцільно оцінити застосування даної схеми вимірювань для контролю деталей з урахуванням деякого розкиду товщини підложки  $\Delta \pm \delta \Delta$ , показника заломлення  $n \pm \delta n$ .

Для дифракції Фраунгофера поперечний розмір  $2a$  об'єкту у вигляді щілини, або штриха визначається співвідношенням

$$2a = z\lambda / x_1 \quad (1.50)$$

де  $z$  - відстань від об'єкту дифракції до площини фотоприймача;

$\lambda$  – довжина хвилі лазерного випромінювання; відстань між віссю симетрії дифракційної картини та її першим мінімумом.

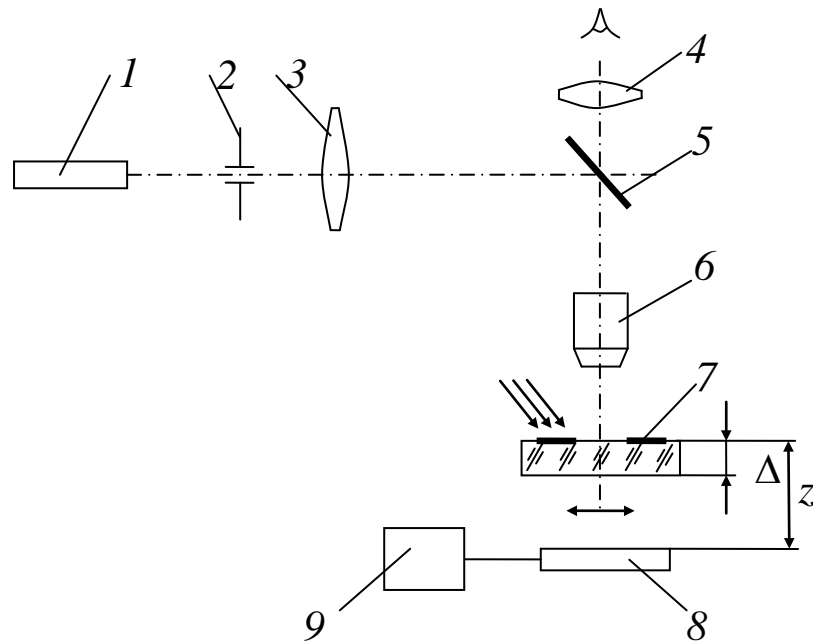


Рис. 1.14. Оптична схема дифракційного вимірювача, що працює в світлі, що проходить: 1 – лазер; 2 – діафрагма; 3 – лінза телескопічної системи; 4 – окуляр; 5 – світлоділильна пластина; 6 – об'єктив; 7 – об'єкт; 8 – фотоприймач; 9 – вимірювальний прилад

За наявності підкладки з  $n > 1$  відстань  $x_1$  зменшиться до  $x'_1$  (рис. 1.15), а з урахуванням коливань коефіцієнта заломлення і товщини підкладки  $x'_1$  отримуємо певну нестабільність, яка дорівнює

$$\delta = \frac{x_1'' - x_1'}{x_1} 100\% \quad (1.51)$$

Якщо визначення розміру елементу  $2a$  проводиться по ширині нульового максимуму дифракційної картини, то вплив підложки виявляється як зміна відстані між першими симетричними мінімумами.

Кут  $\varphi_1$  відповідає першому мінімуму при дифракції Фраунгофера (рис. 1.16), знаходиться з виразу

$$\sin \varphi_1 = \lambda / 2a \quad (1.52)$$

На рис. 1.17 представлені результати розрахунку граничної похибки, що вноситься підложкою, для розміру елементів  $2a = 1 \div 10$  мкм і випадку використання Ne-He лазера ( $\lambda = 0,6328$  мкм).

Розрахунок проводився для  $\Delta = 3 \pm 0,3$  мм і  $\Delta = 1 \pm 0,05$  мм.



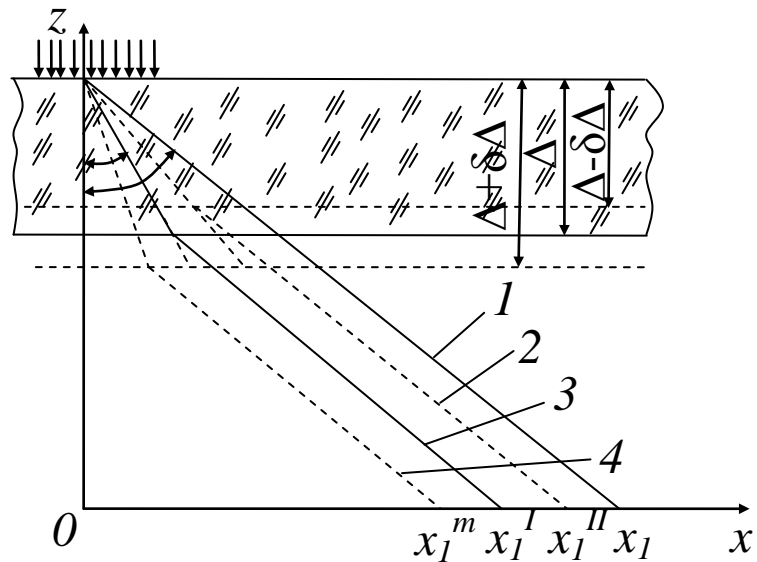


Рис. 1.15. Спотворення ходу дифрагованих променів в підкладці: 1 – підкладка відсутня; 2 – підкладка товщиною  $\Delta$  з показником заломлення  $n$ ; 3 – підкладка  $(\Delta - \delta\Delta)$ ;  $n - \delta n$ ; 4 – підкладка  $(\Delta + \delta\Delta)$ ;  $n + \delta n$ ;  $\sin \varphi / \sin i = n$ .

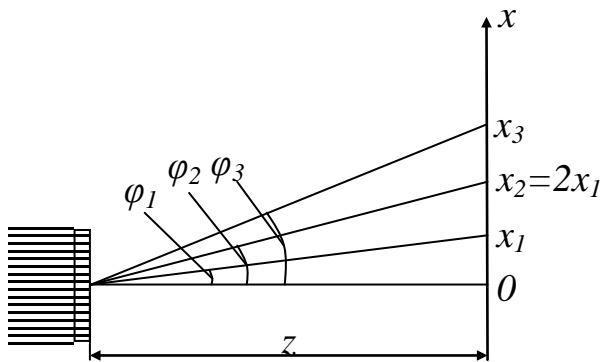


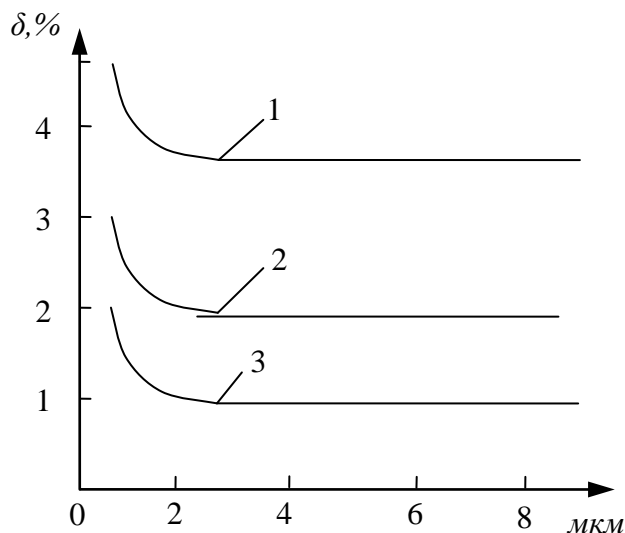
Рис. 1.16. Хід променів, що відповідає першим трьом мінімумам дифрагованої хвилі

Розрахунок проводився для  $\Delta = 3 \pm 0,3$  мм і  $\Delta = 1 \pm 0,05$  мм.

Як впливає з рис. 1.17, при достатньому віддаленні площини спостереження (фотоприймача) від об'єкту дифракції похибка, що вноситься підкладкою, невелика і не перевищує 1-2%, що здебільшого і є прийнятним для технологічного контролю.

У випадку, якщо йдеться не про абсолютні вимірювання, а про порівняння з деяким тестовим елементом, наприклад із зразковим еталоном, похибка знизиться до долей відсотка, оскільки для номінальних  $\Delta$  величина  $\delta$  дорівнюватиме нулю.

Рис. 1.17. Вплив підкладки на результати вимірювання за порівнянням з ідеальним випадком: 1 –  $z = 50$  мм; 2 –  $z = 100$  мм; 3 –  $z = 200$  мм



Слід зазначити, що для кожного типу підкладок необхідне додаткове калібрування вимірювача. Крім того, можливі перевідбиття лазерного випромінювання від граней підкладки призводять до паразитної модуляції контрольованої дифракційної картини.

При необхідності контролю розмірів елементів, нанесених на непрозорі підкладки, вимушеним є перехід на використання дифракції у відбитому світлі. Тут можливі два види оптичної схеми дифракційного вимірювача. Перша припускає похиле розташування об'єктиву по відношенню до площини предметів. Вісь об'єктиву розташована у цьому випадку в площині, що проходить через подовжню координату вимірюваного елементу (щілини, штриха) і нормаль до площини предметів, і складає з площиною предметів деякий кут  $\alpha$ .

Використання такої схеми накладає обмеження на передній відрізок об'єктиву. При малих розмірах переднього відрізка утруднюється виведення дифракційної картини убік, минувши оправу об'єктиву, особливо об'єктиву з великим збільшенням. При необхідності може бути забезпечено і автоматичне, і візуальне наведення зонда.

Візуальне наведення лазерного зонда на вимірюваний елемент можливо тільки при попаданні нульового дифракційного максимуму, в канал спостереження, при цьому необхідно використовувати додаткову систему об'єктив-окуляр. Подібна оптична схема може виявитися зручною для контролю розмірів регулярних структур, коли в область лазерного зонда повинно потрапляти одночасно від 10 до 20 елементів. В цьому випадку передній відрізок об'єктиву, що формує зонд діаметром від 100 до 200 мкм, може бути достатнє великим від 10 до 30 мм і не перешкоджати бічному відведенню дифракційної картини.

При контролі розмірів одиночних елементів, розташованих на непрозорій підкладці, коли розмір зонда є мінімальним, зручно використовувати оптичну схему автоколімації. У цьому випадку вісь об'єктиву є перпендикулярною площині предметів.

Об'єктив є загальним для вимірювача і візуального каналів, що розділяються світлоділильною пластиною. Розміри і форма лазерного зонда визначаються діафрагмою і параметрами телескопічної системи, яка складається з лінзи і об'єктиву. Наведення лазерного зонда здійснюється зміщенням зображення проєкції діафрагми в площині предметів з вимірювальним елементом. Відбита діафрагмована хвиля, пройшовши телескопічну систему у зворотному напрямі, спрямовується дзеркалом на фотоприймальну площинку пристрою реєстрації. Її розходимість при цьому зменшується і протяжність картини в площині фотоприймача може бути легко обмежена від 10 до 15 мм. Це дозволяє використовувати для реєстрації дифракційного спектру ПЗЗ-фотоприймачі (див. § 4.1.1).

#### **§ 1.4.1.1. Засади контролю розмірів елементів структур за тестовими дифракційними ґратками**

Одним з найбільш досконалих методів контролю лінійних розмірів елементів є метод, що використовує явище дифракції на періодичних структурах. Він має низку переваг, що роблять його перспективним для виробничого контролю різних технологічних процесу (механічної обробки різанням, фотолітографії, тощо) і розмірів елементів сучасних надточних деталей аж до субмікронного діапазону. Цей метод має наступні переваги.

1. Наявність великих, в порівнянні з дифракцією на одиночних елементах, відносних енергій в дифракційних максимумах високих порядків, що дозволяє здійснювати точні відносні вимірювання інтенсивностей в різних дифракційних порядках і тим самим підвищити точність методу.

2. Отримання об'єктивних даних не про окремі (часто випадкових) зміни розмірів елементів, а про правильність виконання певної геометрії групи елементів деталей, тобто результатів середніх відхилень розмірів деталі від заданих. Це дозволяє здійснювати оперативний виробничий контроль відхилень технологічного процесу від оптимальних режимів.

3. Легкість і швидкість отримання об'єктивних статистичних даних про відхилення розмірів елементів мікродеталей (таких як середній розмір елементу  $a$ , дисперсія тощо), що необхідно, наприклад в технології мікроелектроніки, де деталі, що містять десятки й сотні тисяч елементів, виготовляються груповими методами.

4. Невисокі вимоги до оптичної системи, а також точності наведення зондуючого лазерного пучка, оскільки для отримання дифракційного просторового спектру достатнє лише попадання пучка світла на вимірювану періодичну структуру.

5. Легкість автоматизації процесу контролю в умовах масового

виробництва надточних деталей.

6. Висока інформативність методу, що дозволяє не тільки вимірювати розміри елементів, але й контролювати форму їх профілю.

7. Можливість контролю в динаміці безпосередньо під час технологічного процесу.

8. Відносно проста реалізація методу, його надійність та економічність (низька вартість одиничного вимірювання).

Даний метод найлегше реалізувати, використавши як періодичну структуру прості тестові дифракційні амплітудні ґратки, представлені на рис.1.18, які можуть бути виконані, наприклад механічною обробкою, або на хромовому фотошаблоні.

Основна відмінність методу дифракційного контролю по періодичних структурах від методу, описаного вище, полягає в тому, що вимірювання розміру елементів по дифракційному спектру здійснюється не вимірюванням відстані між дифракційними екстремумами, а по співвідношенню енергій в них. Спосіб заснований на визначенні співвідношень інтенсивностей в різних порядках дифракції.

Стосовно завдань мікроелектроніки такий контроль відхилення розмірів по тестових дифракційних ґратках був запропонований вперше для контролю деталей типу фотошаблонів у [1.23].

Аналіз дифракційної картини, створений групою штрихів, що утворює дифракційні ґратки, дозволяє усунути вплив залежності точності вимірювань від енергії в дифракційних порядках, що властиво методу вимірювань по дифракційній карті одного елементу. В цьому випадку маємо значно більше енергії, що полегшує вимірювання і підвищує їх точність. Дійсно, в дифракційному розподілі від окремого елементу необхідно з високою точністю локалізації (одиниці мікрметрів) вимірювати енергію, складову лише десятки долі відсотка від загальної енергії, що пройшла через вимірюваний елемент.

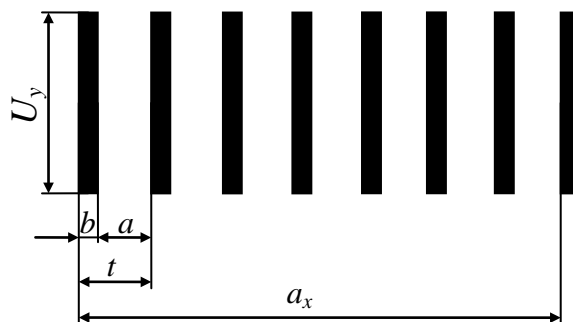


Рис. 1.18. Тестові амплітудні дифракційні ґратки

При дифракційному вимірюванні відхилень лінійних розмірів елементів по тестовій структурі, що містить групу елементів (штрихів дифракційних

граток) в площині вимірювань, маємо розподілення енергії, аналогічне представленому на Рис. 1.19.

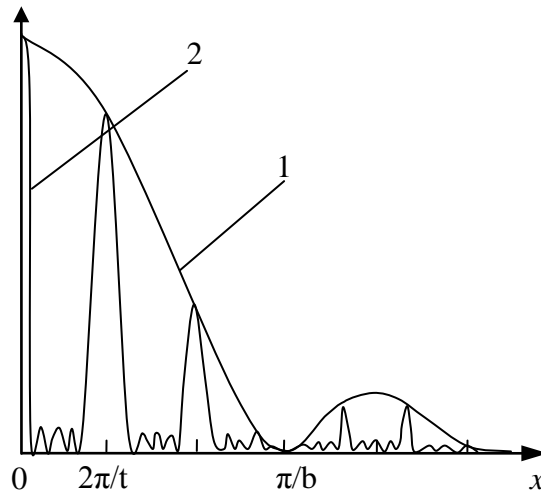


Рис. 1.19. Розподіл інтенсивності в дифракційному зображенні періодичної штрихової структури (тестових дифракційних ґраток)

Інтенсивність головного максимуму з порядком  $k$  рівна:

$$I_k = I_0 N^2 t^2 \sin^2(\pi k R) / (\pi k a)^2 \quad (1.53)$$

де  $I_0$  – інтенсивність нульового максимуму;

$N$  – число штрихів,

$t = a + b$  – постійна ґратки (період);

$a$  і  $b$  – ширина штриха і проміжку відповідно;

$R = a/t$ .

Вираз (1.53) показує, що інтенсивність світла росте пропорційно квадрату числа штрихів через перерозподілення повної, що пройшла через всі штрихи, енергії, унаслідок інтерференції дифрагованих пучків.

Окрім того, із збільшенням числа  $N$  відбувається різке звуження головних максимумів, тобто автоматична вибірка дифракційних порядків, високоточна фільтрація спектру. Збільшення інтенсивності порядках дифракції і автоматичне високоточне фільтрування спектру є основними перевагами методу вимірювання лінійних розмірів елементів тестової структури і визначення його високої точності. Крім того, на відміну від попередніх методів, не вимагається точного наведення пучка променів на вимірювальний елемент.

Отже, якщо тест-об'єкт є ґраткою з амплітудним коефіцієнтом пропускання по періоду ґратки  $f(x) = f_p \exp(i\varphi_0)$  при  $0 \leq x < a$  (маскуюче відкриття);  $f(x) = 1$  при  $a \leq x < t$  (світлий штрих), де  $I_0$  – амплітудний коефіцієнт

ослаблення світла маскуючим покриттям,  $\varphi_0$  – фаза, то відносна інтенсивність в головних дифракційних максимумах визначається виразами:

$$I_0 = (1 - R)^2 + R^2 f_0^2 + 2 f_0 R (1 - R) \cos \varphi_0 \quad (1.54)$$

$$I_k = (1 + f_0^2 - 2 f_0 \cos \varphi_0) (\sin^2 \pi k R) / (\pi k)^2 \quad (1.55)$$

Розподіл інтенсивності в кожному дифракційному максимумі визначається функцією виду  $\text{sinc}^2 x$ :

$$I(x; y) = c \left[ \frac{\sin(\pi a_x x / \lambda z)}{\pi a_x x / \lambda z} \right]^2 \left[ \frac{\sin(\pi a_y y / \lambda z)}{\pi a_y y / \lambda z} \right]^2 \quad (1.56)$$

де  $a_x$  і  $a_y$  відповідають розмірам дифракційних ґраток по осях  $x$  і  $y$ .

На рис. 1.19 представлений типовий розподіл інтенсивності (крива 2) в дифракційному зображенні штрихової структури (дифракційні ґрати містять п'ять штрихів з періодом  $t$ ,  $a$  – ширина прозорого штриха).

Огинаюча (крива 1) — розподіл інтенсивності, обумовлений дифракцією на кожній щілині. Положення кожного головного максимуму в площині дифракції Фраунгофера визначається виразом

$$x_k = k \lambda z / t, \quad (1.57)$$

де  $z$  – відстань від об'єкту до площини вимірювання.

Для забезпечення достатньої точності вимірювань необхідно, щоб сусідні максимуми не перекривалися, тобто щоб відстань між сусідніми максимумами по  $\lambda z / t$  крайньому заходу в 5–10 разів перевищувало характерний розмір кожного максимуму:  $2 \lambda z / a_x$ :  $\lambda z / t \geq (5 - 10) 2 \lambda z / a_x$ . Звідки,  $a_x / t = N = 10 - 20$  тобто дифракційні ґратки повинні містити не менше 10 штрихів. При  $N > 10$  вторинні максимуми вельми незначні і практично не позначаються на точності вимірювань.

Рівняння (1.54) і (1.55) показують, що зміна  $R$ , тобто зміна ширини штрихів  $a$ , (оскільки  $R = a/t$ , а  $t = \text{const}$  призводить до зміни інтенсивності як в нульовому, так і в інших дифракційних порядках. Це може бути використано для вимірювань відхилень розмірів топологічного рисунку по тестовій структурі, причому ці вимірювання характеризують середній по структурі розмір елементу  $\bar{a}$ , що зручно при контролі групових технологічних процесів, характерних, наприклад для деталей мікроелектронної апаратури.

З (1.54) видно, що для непрозорого маскуючого покриття, у якого  $f_0 \approx 0$  поворот фази відсутній (наприклад, для шаблонів, що мають контраст, близький до ідеального), можна використовувати для вимірювань відношення енергій в нульовому максимумі до енергії одного з головних максимумів, наприклад другого. Проте для напівпрозорих покриттів і фазових об'єктів найдоцільніше використовувати відношення енергії в першому і другому головних максимумах [1.24, 1.25]. Дійсно, якщо розглянути (1.55), то легко бачити, що від невизначеності, пов'язаної з наявністю  $f_0$  та  $\varphi_0$ , можна позбавитися, взявши відношення інтенсивностей будь-яких порядків  $k_{m;n} \neq 0$ .

При цьому вираз, що є у дужках, скоротиться, оскільки він однаковий для всіх порядків, окрім нульового:

$$i_{m;n} = I_{k_m} / I_{k_n} = k_n^2 \sin^2 \pi k_m R / k_m^2 \sin^2 \pi k_n R, \quad (1.58)$$

де  $k_m, k_n$  – порядки головних максимумів.

Вибір порядків визначається енергетичними міркуваннями і точністю вимірювань, яка при цьому забезпечується. Як вимірювана величина можна узяти  $i_{21}; i_{31}; i_{32}$  тощо. Проте найбільш оптимально визначати співвідношення енергій в другому і першому дифракційних максимумах:

$$i_{21} = I_{k_2} / I_{k_1} = \sin^2 2\pi R / 4 \sin^2 \pi R = \cos^2 \pi R. \quad (1.59)$$

Із співвідношення (1.58) легко добути середнє значення вимірюваного елемента в періодичній структурі деталі

$$a = (t/\pi) \arccos(i_{21})^{1/2}. \quad (1.60)$$

Очевидно, що найточніше можуть бути виміряні близькі за значенням інтенсивності  $I_2$  і  $I_1$ , тобто якщо  $i_{21}$  близька до одиниці, однак, це має місце при  $R \rightarrow 0$  або  $R \rightarrow 1$  що незручно для практичного застосування. Якщо узяти  $R \rightarrow 0,5$  (тобто меандр,  $a = b$ ), то інтенсивність в другому порядку близька до нуля, що приводить до пониження точності її відносного вимірювання.

Компромісним є значення  $R \approx 0,25$ , тоді виміряні значення  $I_2$  і  $I_1$  будуть близькими ( $I_2 \approx 0,5 I_1$ ), і точність вимірювання обох інтенсивностей буде порівняна. При  $R = 0,25$  та вимірюванні співвідношення енергій в другому і першому порядках забезпечується найбільш висока чутливість методу до відхилень розмірів і найбільша точність вимірювань.

У [1.25] наголошується, що вимірювання в більш вищих порядках, а також в нульовому порядку знижують точність вимірювань, при чому інтенсивність в нульовому порядку визначається з найменшою точністю, оскільки залежить від коефіцієнта пропускання підкладки та покриття, а також наявності різних дефектів. Крім того, вона залежить від розташування освітлюючого пучка відносно структури ґратки, вимагає точної орієнтації пучка для того, щоб виключити попадання в нульовий порядок недифрагованого світла, яке пройшло прямо.

Оцінімо точність вимірювань по описуваній методиці. Згідно (1.60), маємо  $da/di_{21} = -(t/2\pi)(1-i_{21})^{-1/2} i_{21}^{-1/2}$  або, опускаючи знак і враховуючи, що при  $R = 0,25, i_{21} = 0,5$ , отримуємо

$$\Delta a = \pi^{-1} t \Delta i_{21} \quad (1.61)$$

Видно, що помилка у вимірюванні середніх розмірів ширини елементів в дифракційній тестовій структурі не перевищує по порядку величини похибки вимірювання відношення інтенсивностей в двох порядках.

Якщо вимірювати  $i_{21}$  з точністю близько 1%, що достатньо легко здійснюється завдяки розглянутим вище умовам ( $N > 10, I_2$  і  $I_1$  близькі по значенням), то при періоді ґраток  $t = 10$  мкм (при  $a = tR = 2,5$  мкм) отримаємо

$\Delta a = 0,03$  мкм; в принципі, досягнута і велика точність – до  $0,01$  мкм. Період  $t$  може бути виміряний також дифракційним способом за відстанню між сусідніми дифракційними максимумами відповідно до формули ґратки  $\sin \alpha_K = \sin \alpha + k\lambda/t$ , де  $\alpha_K$  – кут дифракції, відповідний  $k$ -му максимуму;  $\alpha$  – кут падіння пучка на дифракційну ґратку. Точність визначення  $t$  цим способом сягає  $\pm 0,5\%$ .

Проте, враховуючи, що при проведенні фотохімічних операцій змінюється тільки ширина штрихів  $a$ , а період  $t$  залишається постійним, можна для даного фотошаблону визначити  $t$  шляхом усереднювання вимірів 10–20 періодів ґратки на звичайному мікроскопі з окуляром-мікрометром. При цьому точність вимірювань групи елементів близько  $1$  мкм забезпечить визначення  $t$  з точністю близько  $0,05$  мкм, тобто для  $t = 10$  мкм також маємо похибку близько  $0,5\%$ , що згідно (1.61) призведе до додаткової похибки у визначенні середніх розмірів елементів не більше  $0,01$  мкм.

При проведенні практичних вимірювань відхилень лінійних розмірів елементів в топологічному рисунку, найдоцільніше вибирати штрих  $a$ , рівним розміру найбільш значущого елементу (наприклад, розміру області формування транзисторної структури) або деякому мінірозміру, присутньому в мікрозображенні. Вибираючи складнішу структуру дифракційних ґраток (шпаруватість, число і розташування елементів в періоді), наприклад ґрати з порядками однакової інтенсивності, можна в принципі забезпечити вимірювання відходу відразу декількох розмірів штрихів, що містяться в ґратках, найбільш важливих для контрольованого процесу. Використання як тест-структур дифракційних ґраток з складним періодом, що містять штрихи різної ширини, забезпечує отримання дифракційної картини з рівною інтенсивністю в декількох бічних порядках [1.26]. Це дозволяє підвищити точність вимірювань, оскільки вимірювання близьких за значенням величин може бути, як відомо, здійснено із значно більшою відносною точністю, чим величин, що відрізняються на один-два порядку, що іноді має місце при аналізі дифракційного розподілу енергії по порядках від інших структур.

Застосованість розглянутого вище методу залежить від можливої області використання формули (1.60), що визначається дотриманням умов дифракції Фраунгофера. Строго кажучи, скалярна теорія дифракції застосовна за умови  $t \geq \lambda$  та  $a \geq \lambda$ . Проте у низці робіт [1.27] вказується, що результати розрахунків по скалярному наближенню практично співпадають з результатами строгої векторної теорії, аж до розмірів  $a \approx (0,5 - 1)\lambda$  похибкою, що не перевищує  $0,05\lambda$ . Отже, розглянутий метод може бути використаний для вимірювання розмірів до  $0,2 - 0,3$  мкм з похибкою  $0,02 - 0,03$  мкм, що, мабуть, є близьким до гранично досяжних значень.

Запропонована вище методика вимірювань може бути застосована і для контролю розмірів елементів безпосередньо на деталях типу напівпровідникових пластин, проте є деякі труднощі. По-перше,



співвідношення, представлені вище, ґрунтувалися на припущенні, що профіль штрихів дифракційних ґраток має прямокутну форму, що справедливо для таких об'єктів, як фотошаблони, але не відноситься до напівпровідникових структур з різною формою профілю. По-друге, напівпровідникові структури є змішаними амплітудно-фазовим ґратками і ґратками, що працюють на віддзеркалення (напівпровідникові структури необхідно контролювати у відбитому світлі). Звичайно, розрахунковим шляхом можливий облік непрямокутності профілю ґратки. При цьому повинна бути передбачена можливість реєстрації інтенсивностей в декількох порядках. Однак в цьому випадку, мабуть, доцільно використовувати дифракційну тестову структуру не для абсолютних вимірювань розмірів елементів, а для контролю їх постійності, тобто для високоточного контролю стабільності технологічних процесів (експонування, проявлення, травлення). При цьому точність такого контролю визначатиметься постійністю форми профілю тестової структури.

Тестові структури у вигляді дифракційних ґраток можуть бути використані також і для вимірювання висоти фазових структур (глибини рельєфу дифракційно-оптичних елементів, напівпровідникових структур тощо), точність вимірювань при цьому може досягати 0,01–0,001 мкм. Великою гідністю методу є те, що вимірювання можуть проводитися в динаміці, контролюватися в ході процесу і легко автоматизуються. Слід відзначити, що у низці випадків можливе безпосереднє отримання статистичної інформації про розміри деталі дифракційним методом без використання тестових структур за допомогою елементів, що повторюються в деталях, таких як елементи радіоелектронних пристроїв, ліній затримки тощо.

Дійсно, у випадку, якщо надточна деталь містить повторювані елементи будь-якої форми, то в дифракційній картині від такої ґратки спостерігатиметься строго певна сукупність дискретних екстремумів — зображення «оберненої ґратки» [1.28] з періодами по осях  $x$  і  $y$ :  $t_x^* \sim \lambda/a$  та  $t_y^* \sim \lambda/b$  де  $t_x$  і  $t_y$  — кроки ґратки по осях  $x$  і  $y$  відповідно. Кожен вузол такої двомірної оберненої ґратки може бути охарактеризовано парою чисел  $k$  і  $h$ , що мають сенс цілочисельних координат в спектральному просторі або порядку дифракційного максимуму.

Комплексна амплітуда хвилі, що відповідає максимуму з індексами  $k$  і  $h$  є Фур'є-перетворенням функції прозорості об'єкту, тобто функцією, що описує елементи деталі:

$$\tilde{F}(h; k) = C \int_{-t_x/2}^{t_x/2} \int_{-t_y/2}^{t_y/2} \tau(x; y) \exp[-2\pi i(hx + ky)] dx dy \quad (1.62)$$

Інтенсивність  $I(h; k) = \tilde{F}(h; k) \tilde{F}^*(h; k) = |\tilde{F}(h; k)|^2$ , де  $C$  — константа;

$\tau(x; y)$  - функція прозорості контрольованої ділянки (наприклад, фотошаблону) або його світлимість (об'єкт, що відображає або той, що світиться сам) з координатами  $x$  і  $y$ ;

$\sim$  — знак перетворення Фур'є;

\* – знак комплексно-спряженої величини.

Зворотнє Фур'є-перетворення функції  $\tilde{F}^*(h;k)$  дає початкову функцію, тобто дозволяє обчислити функцію  $\tau(x;y)$  для будь-яких координат об'єкту:

$$\tau(x;y) = C' \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \tilde{F}(h;k) \exp[2\pi i(hx + ky)] \quad (1.63)$$

Знання розподілу прозорості по об'єкту  $x(x;y)$  дозволяє визначити всі геометричні характеристики топологічного рисунку. Для цього необхідно знайти тільки комплексну амплітуду хвилі  $\tilde{F}(h;k)$ .

Як відомо, всі приймачі випромінювання можуть реєструвати тільки інтенсивність, тобто квадрат модуля комплексної амплітуди світлової хвилі:  $I(h;k) = |\tilde{F}(h;k)|^2$  інформація ж про фазу зазвичай втрачається. Виключення складає лише голографія, де завдяки використанню опорної хвилі і інтерференції її з реєстрованою хвилею фіксується також і фазова інформація. У даному ж випадку у зв'язку з тим, що у загальних рисах контрольований топологічний рисунок деталі відомий заздалегідь, для кожної пари  $h;k$  обчислити по (1.62) можна обчислити  $\tilde{F}(h;k)$ . Згідно [1.29], фази розрахункових комплексних амплітуд добре відповідають фазам експериментальних значень  $\tilde{F}(h;k)$  і їх можна використовувати при розрахунках точної геометрії рисунку по (3.27).

Для реалізації даного методу необхідно: зареєструвати дифракційну картину від плоскої монохроматичної хвилі, падаючої на контрольовану структуру (наприклад, за допомогою багатоеlementного матричного ПЗ-фотоприймача), і запам'ятати масив вимірних даних  $I(h;k)$  за допомогою ЕОМ; для кожної пари  $h;k$  обчислити по (1.62) комплексну амплітуду і привласнити фази цих комплексних величин масиву експериментальних значень  $\tilde{F}(h;k)$  і, нарешті, за (1.63) визначити реальну геометрію об'єкту шляхом підсумовування ряду Фур'є з раніше обчисленими комплексними коефіцієнтами.

У [1.29] наголошується, що таким чином можуть бути проаналізовані форма, розміри і взаємне розташування елементів топології деталі. Причому метод найбільш ефективний для регулярних структур (елементів, що повторюються), оскільки розрахована за (1.63) функція прозорості об'єкту  $\tau(x;y)$  має сенс зображення «елементарного осередку» (фрагмента) структури, усередненого по всім, що беруть участь у формуванні дифракційної картини елементам. Точність методу визначається повнотою аналізу дифракційної картини і при кінцевих  $h$  та  $k$  обмежується наявним набором  $I(h;k)$ . Наприклад, при  $|h_{\max}| = |k_{\max}| = 40$  відносна точність локалізації краю  $\Delta = t/150 - t/200$  для  $t=10$  мкм похибка складає 0,05–0,07 мкм.

Сучасні ЕОМ дозволяють розраховувати  $\tau(x; y)$  в одній точці за час близько 0,01 с. Час же, необхідний для аналізу елементарного осередку з числом крапок 50 x 50, складає близько 2 хв, що дозволяє створювати достатньо компактні системи, що працюють за розглянутим принципом.

Зупинимося далі на можливості дифракційного методу контролю розмірів елементів деталі з урахуванням форми профілю травлення, що важливо на практиці. Слід зазначити, що висока чутливість дифракційного методу вимірювань і відмінності форми профілю елементів у низці випадків створюють труднощі при проведенні прецизійних лінійних вимірювань і не дозволяють, наприклад, здійснювати вимірювання ступінчастих структур з глибиною рельєфу, рівною з довжиною хвилі світла або більшою за неї.

Наслідком цього є той факт, що достатньо прості пристрої, що реалізують дифракційний метод вимірювань, наприклад за описаним вище способом вимірювання співвідношення енергії в другому і першому порядках, можуть бути використані лише для вимірювань щодо тонких шарів товщиною  $d \ll \lambda$ , на яких рисунок має достатньо різкі краї (наприклад, для контролю розмірів елементів на металізованих фотошаблонах, де  $d$  складає від 0,08 до 0,1 мкм). Здійснення ж прецизійних дифракційних вимірювань розмірів елементів при товщині шару  $d \gg \lambda$  наявність похилих сходинок в структурі представляє великі теоретичні та технічні труднощі.

За допомогою тестових дифракційних ґраток і застосування похилого падіння пучка світла можливо вимірюванням інтенсивності світла дифракційних порядків визначати розміри елементів з урахуванням їх схилів [1.27]. Основні геометричні співвідношення в запропонованій схемі вимірювань і тестових дифракційних ґратках, сформованих яким-небудь чином (наприклад, травленням) на об'єкті контролю (пластині), представлені на рис.1.20. При дифракції похилого довільно орієнтованого пучка світла на таких ґратках всі порядки дифракції лежать на поверхні конуса, вісь якого співпадає з віссю  $ou$ , а кут при верхівці дорівнює  $2\Theta$ , тобто для будь-яких порядків дифракції вірне співвідношення  $\cos(k_n j) = \cos \Theta$ , де  $k_n$  – одиничний вектор у напрямі розповсюдження  $n$ -го порядку дифракції;  $(0, 1, 0)$  – орти у напрямі осі  $ou$ .

Направляючі косинуси дифрагованих хвиль мають вигляд:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_n &= \cos \varphi - n\lambda / t; & \cos \Theta_n &= \cos \Theta; \\ \cos \eta_n &= \sqrt{1 - \cos^2 \Theta - (\cos \varphi - n\lambda / t)^2} \end{aligned} \quad (1.64)$$

Отже, в площині, перпендикулярній штрихам ґратки і віддаленій від площини  $xoz$  на відстані  $l$ , всі дифракційні порядки розташовані по колу радіусом  $r = l \operatorname{tg} \Theta$  рис. 1.20.

Координати  $n$ -го дифракційного порядку в цій площині визначені як:

$$\begin{aligned}
 x_n^l &= l \left( \cos \varphi - \frac{n\lambda}{t} \right) / \cos \Theta; \\
 y_n^l &= (l / \cos \varphi) \sqrt{\sin^2 \Theta - \left( \cos \varphi - \frac{n\lambda}{t} \right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{1.65}$$

Кількість порядків, що розповсюджуються, може бути визначено за (1.65) з умови позитивного підкорінного виразу.

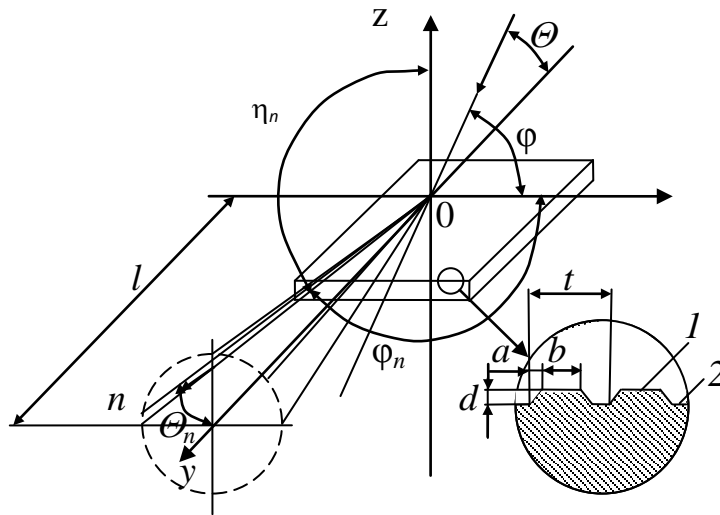


Рис. 1.20. Дифракція пучка світла при похилому падінні на тестову рель'єфну дифракційну ґратку

Достатньо прості формули для інтенсивності світла  $I_n$  у порядках дифракції можна отримати у випадку, якщо зонduючий пучок світла лежить в площині, перпендикулярній площині ґраток і паралельною її штрихам, тобто при  $\varphi=90^\circ$  (на рис. 1.20 — площина  $yo z$ ):

$$I_n \approx (4/n^2) \left\{ \begin{aligned} &R_1^2 \sin^2(\pi n B) + R_2^2 \sin^2[\pi n(B + A/2)] - \\ &- 2R_1 R_2 \sin(\pi n B) \sin[\pi n(B + A/2)] \cos \Delta \end{aligned} \right\} \tag{1.66}$$

Вираз (1.66) отриманий за наступних умов: фазова ґратка сформована на непрозорій підкладці з коефіцієнтом віддзеркалення від верхньої частини структури 1 (див. рис. 1.20), дорівнює  $R_1 e^{i\varphi_1}$ , нижньої частини 2 —  $R_2 e^{i\varphi_2}$ , похилі стінки структури шириною  $a$  є абсолютно поглинаючими  $R_a=0$ .

При цьому функція амплітудного коефіцієнта віддзеркалення ґрат  $R(x)$  приймає наступні значення:

$$R(x) = \begin{cases} R_1 & \text{при } 0 < x < B; \\ 0 & \text{при } B < x < (B + A) \quad i \quad (1 - A) < x < 1; \\ R_2 e^{i\Delta} & \text{при } (B + A) < x < (1 - A) \end{cases} \quad (1.67)$$

де  $B = b/t$ ;  $A = a/t$ ;  $\Delta = (4\pi d / \lambda \cos \Theta - \varphi_1 - \varphi_2)$  – різниця фаз променів, відбитих від верхньої 1 і нижньої 2 частин дифракційних ґрат з глибиною рельєфу  $d$ . Формула (1.66) може бути спрощена, якщо прийняти рівними коефіцієнти віддзеркалення від верхньої і нижньої частин ґрат:  $R_1 = R_2 = R$ ,  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ . Підбираючи кут  $\Theta = \Theta_{\min}^{mn}$  таким чином, що

$$(4\pi d / \lambda) \cos \Theta_{\min}^{mn} = 2\pi m \dots, \quad (1.68)$$

де  $m$  – ціле число;

$n$  – номер порядку дифракції,

отримуємо наступний вираз

$$I_n^{\min} = 4R^2 / n^2 \left\{ \sin(\pi n B) - \sin[\pi n (B + A/2)] \right\}^2 \dots \quad (1.69)$$

Якщо ж

$$(4\pi d / \lambda \cos \Theta_{\max}^{mn} = \pi(2m + 1), \quad (1.70)$$

то при  $\Theta = \Theta_{\max}^{mn}$

$$I_n^{\max} = (4R / n^2) \left\{ \sin(\pi n B) + \sin[\pi n (B + A/2)] \right\}^2. \quad (1.71)$$

Отримані формули зв'язують зміни величин  $A$  і  $B$ , тобто геометрію схилів ступінчастих структур із зміною інтенсивності в дифракційних порядках 1 при різних кутах падіння  $\Theta$  зонduючого пучка променів. При зміні кута падіння  $\Theta$  максимумами і мінімумами світла в заданому дифракційному порядку  $n$  чергуватимуться. При фіксованому ж куті падіння  $\Theta_{\max}^{mn}$  або  $\Theta_{\min}^{mn}$  залежно від зміни профілю травлення (від зміни  $A$  і  $B$ ) в різних фіксованих дифракційних порядках можуть досягатися максимумами або мінімумами інтенсивності.

За відсутності ж схилів травлення ( $a$ ;  $A = 0$ ) для кута  $\Theta_{\min}^{mn}$ , що задовольняє формулі (1.69), інтенсивність  $I_n^{\min}$  дифракційній картині згідно (1.69) буде рівна нулю. Ця обставина може бути використана для оперативного контролю технологічного процесу механічної обробки деталі або, наприклад процесів травлення структур деталі, оскільки поява дифракційної картини при куті падіння  $\Theta_{\min}^{mn}$  є ознакою відступу схилу травлення від вертикалі ( $A$ ;  $a \neq 0$ ).

Вирази (1.69) і (1.71) можна спростити:

$$\begin{aligned} I_n^{\max} &\approx (1/n^2) \sin^2[(A + B)\pi n] \cos^2(A\pi n); \\ I_n^{\min} &\approx (1/n^2) \sin^2(A\pi n) \cos^2[(A + B)\pi n] \end{aligned} \quad (1.72)$$

Залежності можуть бути використані для визначення геометрії мікроструктур з похилими сходи́нками. При цьому необхідно враховувати, що на результати вимірювань істотний вплив робить поляризація світла в зонduючому пучку. Дослідження впливу поляризації на результати вимірювань,

проведені в [1.30], показують, що одночасне досягнення для  $I_n^{\min}$  всіх дифракційних порядків при  $\Theta = \Theta_{\min}^{mn}$  стає лише для зразку з вертикальними сходишками у тому випадку, коли вектор напруженості поля  $\mathbf{E}$  перпендикулярний штрихам ґрат.

Експериментальні дослідження різних зразків ґрат показали, що навіть для такої поляризації при зміні кута падіння зондуємого пучка  $\Theta$  не досягається  $I_n^{\min}$  одночасно для всіх дифракційних порядків. Виявлено, що при Е-поляризації (коли вектор  $\mathbf{E}$  паралельний штрихам ґрат) кут  $\Theta_{\min}^{mn}$  завжди менший, ніж для Н-поляризації, тобто  $I_n^{\min}$  досягається при більшому значенні  $(d/\lambda)_{\min}$ , причому ця відмінність зростає при збільшенні кута  $\varphi_n$ . Експериментальні дослідження показали також, що для достатньо глибоких структур ( $d \approx 1,5$  мкм), де мінімум інтенсивності  $I_n^{\min}$  досягається згідно (1.69) для декількох кутів падіння  $\Theta = \Theta_{\min}^{mn}$  або  $m = 1, 2, 3$ , інтенсивності в дифракційному порядку  $n$  для різних  $m$  можуть бути різними. Це може бути пояснено тим, що при збільшенні кута падіння зменшується кутовий простір, в якому застосовна прийнята при розгляді скалярна теорія дифракції світла. При Н-поляризації і виборі  $\Theta^{mn}$  [див. (1.69) і (1.70)] зі всіх значень  $m$  слід вибрати максимальні значення, обмежуючись вимірюваннями в декількох молодших порядках дифракції  $n$ .

При нормальному падінні світла на ґрати відмінності експериментальних результатів від розрахункових за скалярною теорією стають істотними, починаючи з кутів дифракції біля  $20^\circ$ , наприклад для ґрат з періодом  $t = 12$  мкм в цю область потрапляє сім дифракційних порядків.

Для структур з вертикальними бічними стінками при похилому падінні і Н-поляризації ці відмінності в дифракційних спектрах також не помітні аж до сьомого порядку. Тому, наприклад, для дифракційних ґрат з  $t = 12$  мкм, де  $\Theta_{\min}^{mn} = 56^\circ$  вимірювання слід проводити за першими п'яти дифракційними порядками при кутах падіння від  $0$  до  $60^\circ$ .

Порівняння результатів дифракційних вимірювань з даними, отриманими на растровому електронному мікроскопі при використанні методики обчислення відношення інтенсивностей світла в різних дифракційних порядках (аналогічно методиці, яка описана вище), показало, що різниця у вимірюваннях не перевищує  $0,15$  мкм.

Точність дифракційного методу при дослідженні подібних рельєфних структур, мабуть, може бути підвищена при використанні векторної теорії дифракції, замість спрощеної скалярної теорії, проте це пов'язано з великими теоретичними і практичними труднощами і не відповідає вимогам оперативного технологічного контролю. При цьому необхідно враховувати, що ІС є багатошаровими структурами з різними коефіцієнтами віддзеркалення, пропускання і поглинання, тобто в реальних умовах мають місце

інтерференційні та інші ефекти, наприклад багатократне віддзеркалення і хвилеводне розповсюдження світла. Окрім цього, оптичні властивості цих плівок можуть змінюватися залежно від технології їх отримання і часто з достатньою точністю невідомі.

Проведений в цьому розділі розгляд переваг, обмежень і сфер використання дифракційних методів контролю дозволяє стверджувати, що дифракційні методи є могутнім засобом надточного контролю геометрії надточних деталей, а в майбутньому при переході до виробництва деталей мікроелектронної техніки із субмікронними елементами вони займуть провідні позиції в сфері надточних вимірювань.

Отже, розглянуті основні засади дії оптичних приладів дозволяють визначитись з напрямом подальшого розвитку методів та засобів виробничого технічного контролю надточних деталей, виготовлених механічною обробкою, що сприятиме підвищенню продуктивності приладобудівної промисловості.

### **Перелік посилань до розділу 1**

- 1.1. Павловский М.А. Влияние погрешностей изготовления и сборки гироприборов на их точность. –К.: Изд-во Киевского ун-та, 1973. - 192 с.
- 1.2. Уразаев З.Ф., Монахов А.Н. Контроль точности расположения поверхностей основных деталей гироприборов. – В сб. Гироскопическое приборостроение. –М.: Машиностроение, 1963.
- 1.3. Метод контроля износа режущего инструмента при точении / Choudhury S.K., Jain V.K., Krishna S. Rama //Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng. -2001. -123, № 1, C.10-12. - Department of Mechanical Engineering, Indian Instit. of technology, Kanpur, India.
- 1.4. Заявка 1083025 ЕПВ МКІ В 23 Q 17/09, В 23 Q 15/16. 00119336.6 Пріоритет 25687399 10.09.99 Японія. Система контроля состояния инструмента. Fjuishima Makoto, Otsubo Hisashi, Nakagawa Hideo. Mori Seiki Co., Ltd, Kakino Yoshiaki, Yasda Precision Tools K.K., Osaka Kiko Co., Ltd., Yamazaki Mazak Corp., Mitsubishi Denki K.K. Онубл. 14.03.01.
- 1.5. Неразрушающий контроль. Россия, 1900 - 2000 г.г.: Справочник / Под ред. Ключева В.В. - М.: Машиностроение, 2001. - 612 с.
- 1.6. Датчики касания для координатно-измерительных машин // Mod. Mach. Shop. -2000. – 72. -№11. -С.244-246.
- 1.7. Измерительные системы фирмы Mapross // Amer. Mach. -2000. -144. -№8. -С.281, 282. Mapross Corp.
- 1.8. Диагностика процесса металлообработки / В.А.Остафьев, В.С.Антонюк, Г.С. Тимчик, – К.:Тэхника, 1991. – С.70 - 90.
- 1.9. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П.Осадчего. –М.: Машиностроение, 1979. -480 с., ил.
- 1.10. Польцер Г., Майснер Ф. Основы трения и изнашивания. Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова; Под ред. М.М. Добычина – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
- 1.11. Левин И.Я. Справочник конструктора точных приборов. –М.: Машиностроение, 1967. – 744 с.
- 1.12. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Теоретичні засади технології ТОНТОР. Монографія. -К.: НТУУ “КПІ”, 2006. – 234 с., іл.
- 1.13. Ключко Т.Р. Моделювання динаміки технологічного процесу для контролю якості токарної обробки деталей типу “вал” // Резание и ин-струмент в технологических системах. Вып. 57. Харьков: ХГПУ. –2000. -С. 115 – 121.
- 1.14. Т.Р.Ключко, В.В.Гриджина. Оптико-электронное устройство исследования спектров сигналов динамики системы СПИД // Актуальные проблемы информатики, управления и вычислит. техники. - Ч.2. - М. - 1987. - С.36.
- 1.15. Tymchik Gr.S., Klotchko T. The lazer intelligent controller for the production materials processing / Intelligent manufacturing systems. Theory and practice. – Belgrade, 1998.-P.24-26.



- 1.16. Ключко Т.Р. Лазерная гибридная система контроля качества механо-обработки // Сучасне машинобудування. –2000. - № 1-2. – С. 22 – 27.
- 1.17. Тымчик Г.С. Когерентные оптические спектральные методы автоматизации геометрического контроля СВЧ линий замедления, Киев, КПИ, 1983.
- 1.18. Митрофанов А.С., Крылов К.И., Прокопенко В.Т. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978. -336 с.
- 1.19. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 120 с.
- 1.20. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978. – 247 с.
- 1.21. Коронкевич В.П., Кривенков Б.Е., Микляев С.В. Оптико-геометрический метод расчета дифракции // Автометрия. -1980. -№2. – С. 25 – 35.
- 1.22. Овчинников В.М., Рогова Н.В., Штейн Г.И. Дифракция световых пучков на щелевой диафрагме с переменным пропусканием краев // Письма в ЖТФ. – 1976. –Т. 2. – Вып. 14. – С.656-660.
- 1.23. А.С. 643747 СССР МКИ G01B 11/24. Способ измерения размеров тестовых элементов рисунка фотошаблонов / Владимиров С.Н., Савин А.И., Шац Я.Б. и др. Опубл. 1979, Бюл. № 3.
- 1.24. Котлецов Б.Н. Микроизображения: оптические методы получения и контроля. – Л.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 1.25. Волков В.В., Герасимов Л.Л., Канаев В.В. и др. Оптические методы измерения топологического рисунка БИС и СБИС // Микроэлектроника. – 1980. – Т. 9. – Вып. 6. – С. 554-563.
- 1.26. Бобров С.Т., Котлецов Б.Н., Минаков В.И., Туркевич Ю.Г. Дифракционные решетки с порядками одинаковой интенсивности //Голографические измерительные системы. – Новосибирск: НГУ. – 1978. – Вып. 2. – С. 123-129.
- 1.27. Быстров Ю.А., Колгин Е.А., Котлецов Б.Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
- 1.28. Nevot L., Croce P. Caracterisation de Surfaces par Reflexion Rasante de Rayons X // Revue de Physique Appliquee. – 1980. – Vol. 15. – P. 761-779.
- 1.29. Никитин А.В. Дифрактометрический метод контроля фотошаблонов //Электронная техника. Сер. 3. – 1982. – Вып. 1(97). – С. 95-97.
- 1.30. Волков В.В., Герасимов Л.Л., Канаев В.В. и др. Измерение размеров ИС с учетом реального профиля травления по дифракционной картине // Микроэлектроника. – 1984. – Т. 13. – Вып. 1. – С. 64-73.

## РОЗДІЛ 2. ОПТИКО-МЕХАНІЧНІ ПРИЛАДИ

Оптико-механічні прилади є різноманітними за призначенням і принципом дії оптичної та механічної вимірювальних систем. У вимірювальному механізмі оптиметрів та оптикаторів поєднуються механічний і оптичний важіль, тому такі прилади іноді називають важільно-оптичними.

За положенням лінії вимірювань прилади поділяють на **вертикальні** (В) і **горизонтальні** (Г), а за способом відліку показників — на **окулярні** (О) і **екранні** (Е). Приклад маркіровки оптиметра: ОВО — оптиметр вертикальний окулярний.

При вимірюванні виробів, розміри котрих більше розміру поля приладу, використовуються порівняльний та безпосередній методи вимірювання предмета.

При порівняльному методі визначається відхилення лінійних розмірів виробу відносно кінцевих мір, калібрів або деталі-зразка. На підставі цього методу побудовані оптиметри, пружньо-оптичні голівки, контактні інтерферометри. В контактних інтерферометрах переміщення вимірювального стрижня призводить до зсуву інтерференційних смуг. В пружньо-оптичних голівках, оптикаторах зсув вимірювального стрижня викликає закручування спіралі, що повертає дзеркало на кут, що є пропорційним зміщенню стрижня. Основні характеристики приладів контактної дії для порівняльних вимірювань наведені в табл. 2.1 [2.1].

### § 2.1. Окулярний мікрометр

Достатнє розповсюдження при оптичних вимірюваннях в технологічному процесі перевірки якості надточних деталей знаходить гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-1-15<sup>x</sup>.

Окулярний гвинтовий мікрометр (рис. 2.1) складається з кожуха 9, основи 4 з хомутиком, що надівається на тубус мікроскопа та закріплюється гвинтом з накаткою, окуляра 7 з діоптрійним механізмом, шкали 8, що закріплена в кожусі 9, пристосування, що відліковує, котре містить гвинт 2, обмежувальну гайку 3, відліковувальний барабан 1 та повзун 5 з сіткою 6.

У передній фокальній площині окуляра розташована нерухома скляна пластина 8 із шкалою з інтервалом між поділками, що дорівнюють 1 мм. В цієї ж площині знаходиться друга, рухома, скляна пластина (сітка 6) з перехреснуванням та індексом у вигляді бісектора. Ця пластина зв'язана з точним мікрометричним гвинтом так, що при його обертанні перехреснування та бісектор переміщуються в полі окуляра відносно нерухомої шкали. Шаг гвинта дорівнює 1 мм. Таким чином при повороті барабану на один оберт бісектор та перехреснування перемістяться на одну поділку нерухомої шкали. Отже, нерухома шкала слугує для відліку кількості повних обертів барабану гвинта. Барабан гвинта поділений на 100 частин.

Табл. 2.1. Основні характеристик приладів контактної дії для порівняльних вимірювань

Параметр	Оптиметр			Ультра-оптиметр ИКП-2	Пружинно-оптична вимірювальна голівка			Інтерферометр контактний		
	Вертикальний		Горизонтальний		01П	02П	05П	Вертикальний ИКПВ	Горизонтальний ИКПГ	
	ИКВ	ИКВЗ								ИКГ
Границя вимірювання по шкалі, мкм	±100			±25	±12	±25	±62	±10		
Ці поділку шкали, мкм	1			0,2	0,1	0,2	0,5	0,05-0,2		
Найбільша довжина вимірюємого виробу, мм	180	200	350	200	Залежить від стійки, що використовується			150	500	
Похибка показань приладу, мм	±0,2 на відрізку шкали до 0,06 мм та ±0,3 на відрізку шкали понад 0,06 мм				±0,06	±0,1	±0,25	150	500	
Габаритні розміри, мм	300x300x500	200x260x630	600x400x340		360x180x70					$\pm\left(0,03+1,5ni\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)$
Маса приладу, кг	18			18	1,5			40	75	
Позначення в формулах: $n$ – число поділок шкали; $i$ - ціна поділку шкали, мкм; $\lambda$ - довжина світлової хвилі; $\Delta\lambda$ - похибка вимірювань $\lambda$ .										

Оберт барабану на одне поділення відповідає переміщенню перехрестя на 0,01 мм. Отже, шкала барабану слугує для відліку сотих часток міліметра.

Повний відлік по шкалам окулярного мікрометра складається з відліку по нерухомій шкалі та відліку по барабану гвинта. Обертанням барабану гвинта по черзі суміщують перехрестя з краями зображення вимірюваного об'єкта. Різниця відліків цих двох вимірювань й визначає розмір зображення вимірюваного об'єкта  $y'$ . Знаючи лінійне збільшення попередньої окуляру частини оптичної системи  $\beta$  можна визначити розмір вимірюваного об'єкту  $y = y' / \beta$ . Ціна поділки всього приладу визначається значенням  $0,01/|\beta|$ .

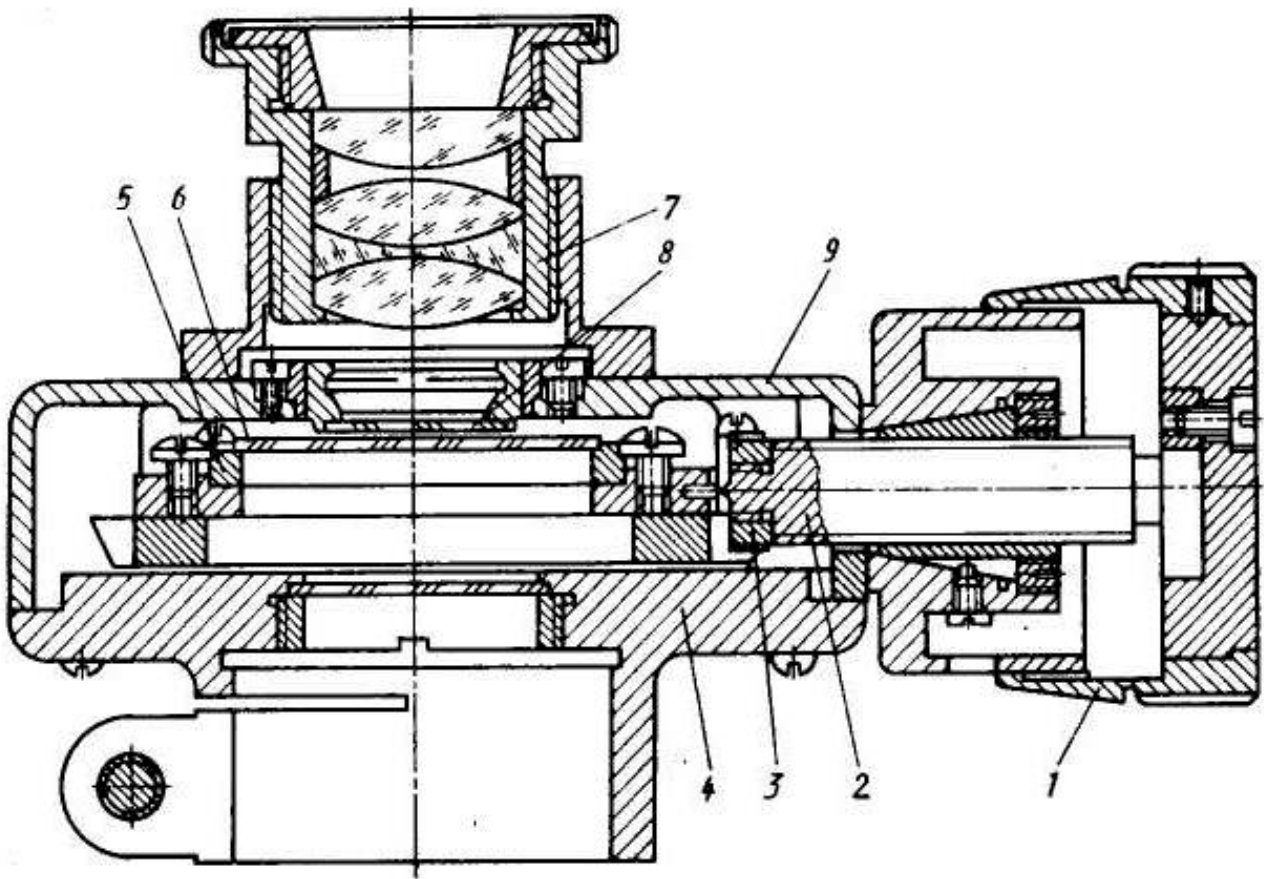


Рис. 2.1. Розріз окуляра мікрометра МОВ-1-15<sup>x</sup>

## § 2.2. Оптикатори

В оптикаторах освітлена джерелом прямокутна щілина з тонкою ниткою по середині за допомогою об'єктива та дзеркала проєкується на вимірювальну шкалу. Оберт дзеркала викликає зміщення щілини по шкалі. Зображення нитки слугує індексом для відліку. Встановивши індекс на нуль по деталі-зразку, визначають відхилення розміру контролюємої деталі від еталона.

Оптикатори є вимірювальними пружинно-оптичними головками, в яких механічна пружинна передача поєднується з оптичним важелем. Вони відрізняються високою точністю і стабільністю вимірювань, призначені для перевірки кінцевих мір і особливо точних вимірювань відповідальних виробів і застосовуються в універсальних стійках С-1 і пристосуваннях з приєднувальним діаметром 28 мм.

Оптикатор (рис. 2.2, а) має такий же пристрій пружинної передачі, як мікрокатор, але замість стрілки в середині пружинної стрічки 1 приклеєне мініатюрне дзеркало 2. Світло від лампочки 6 проходить через конденсор 5 і щілина діафрагми 4, по середині якої натягнута нитка.

Конденсор — це оптична система, що слугує для освітлення даного або проєктованого предмету паралельними променями світла.

Зображення нитки проєктується об'єктивом 3 на дзеркало 2 і, відбившись від нього, потрапляє на шкалу приладу. Оскільки переміщення за шкалою є рівним подвоєному куту повороту дзеркала, помноженому на відстань від дзеркала до шкали, передатне відношення оптикатора у 2 рази більше, ніж у мікрокатора.

Оптикатори мають більший діапазон показань і менші похибки вимірювань і варіації показань, чим мікрокатори з тією ж ціною поділення шкали. Їх основні показники наведені в табл. 2.2.

Табл. 2.2. Основні показники оптикаторів, мкм

Тип	Ціна ділення	Межі вимірювань	Похибки, що припускається, на будь-якій ділянці шкали у межах		Варіація показань
			100 ділень	більше 100 ділень	
01П	0,1	12	0,05	0,1	0,03
02П	0,2	25	0,1	0,2	0,06
05П	0,5	50	0,2	0,4	0,15
1П	1,0	125	0,4	0,8	0,30

Оптикатор (рис. 2.2, б) має корпус 4, на якому встановлені освітлювач 6 і приєднувальна трубка 1. Положення шкали 5 у межах  $\pm 6$  ділень регулюють гвинтом 3. Поворотом кнопок 2 переміщують два світлофільтри (зелений і червоний), які служать показчиками поля допуску виробів.

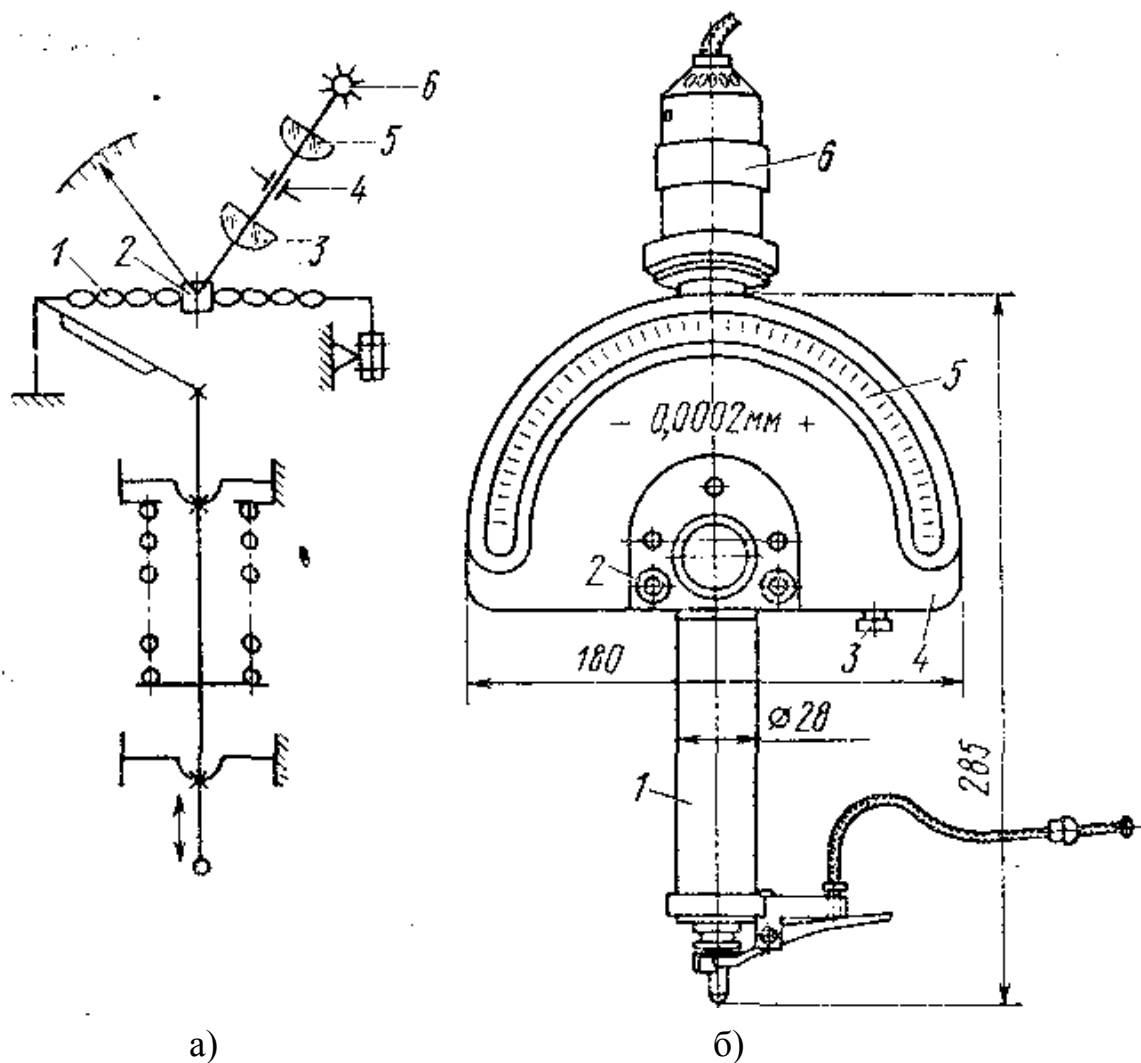


Рис. 2.2. Оптикатор: *а* — схема; *б* — пристрій

Оптикатори використовують для відносних вимірювань методом порівняння з мірою. Порядок налагодження приладу і вимірювань такий же, як для пружинних вимірювальних головок.

### § 2.3. Оптиметри

В оптиметрах за допомогою важілю відбувається оберт дзеркала на кут, пропорційний зсуву вимірювального стрижня.

Засади дії оптиметра засновано на поєднанні автоколіматора з дзеркалом, що гойдається. Метрологічні показники основних типів оптиметрів наведені у табл. 2.3.

Табл. 2.3. Метрологічні показники основних типів оптиметрів

Показники	ОВЭ-02	ОВО-1, ОВЭ-1	ОГО-1, ОГЭ-1
Діапазон вимірювання, мм	0...100	0. ..200	0. ..500
Ціна ділення, мкм	0,2	1,0	1,0
Межі вимірювання за шкалою, мм	+0,025	±0,1	±0,1
Допустима основна похибка, що припускається, мкм, на ділянці шкали, мм:			
від 0 до ±0,015	±0,07	-	-
св. ±0,015	±0,1	-	-
від 0 до ±0,06	-	±0,2	±0,2
св. ±0,06	-	±0,3	±0,3
Варіація показань, мкм	0,02	0,1	0,1

Оптична схема вертикального проекційного оптиметра ИКВ-3 наведена на рис. 2.3. Проміні світла від джерела 1 через систему, що складається з конденсатора 2, теплофільтра 3, лінзи 4 та призми 5, освітлюють шкалу, що нанесена на скляну плоскопаралельну пластину 16 та розташовану в передній фокальній площині об'єктива 14.

Шкала має двісті поділок, що розташовані симетрично по обидві сторони від нуля по сто поділок з кожної сторони. Пройшовши пластину 16 та відбившись від дзеркала 15, проміні попадають в об'єктив 14. Вийшовши з об'єктива паралельним пучком та відбившись від дзеркала 13, проміні попадають на дзеркало, що коливається 11. Після відбиття від дзеркала 11 проміні повертаються на пластину 16, на котрій формують зображення шкали в площині індексу.

Суміщене зображення шкали та індексу проєкується об'єктивом 6 через систему дзеркал 8–10 на екран 12. На екрані знаходяться видовжені штрихи, що оцифровані через десять малих поділок. Кожна мала поділка відповідає 1 мкм. Відлік відбувається по індексу, причому десяті частки мікрометра відліковуються оператором, що є дуже суб'єктивним. Для юстування приладу в схемі передбачений додатковий об'єктив 7.

### § 2.3.1. Вертикальний окулярний оптиметр

Вертикальні оптиметри застосовують для точного вимірювання зовнішніх розмірів виробів: довжини плоскопаралельних кінцевих мір, діаметрів гладких калібр-пробок, різьбових калібрів, кульок та дроту, товщина тонких листів тощо.

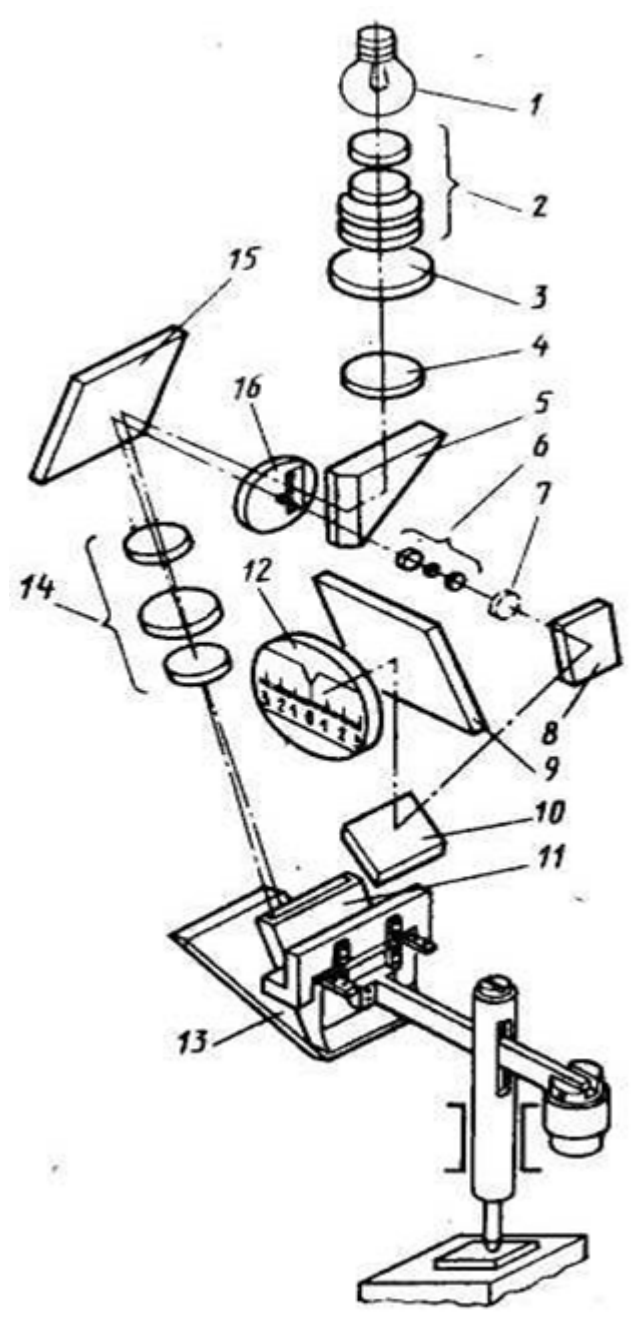


Рис. 2.3. Оптична схема оптиметра

Оптична схема вимірювальної трубки оптиметра з окулярним відліком і його шкала показані на рис. 2.4, *a*.

Світловий потік від зовнішнього джерела світла *a* після відбиття від дзеркала 3, через призму 2 повні внутрішні віддзеркалення освітлює шкалу, нанесену на лівий бік окулярної сітки 4, яка знаходиться у фокальній площині об'єктиву 6. Сіткою є скляна пластина, на якій різними способами нанесені штрихи, цифри, шкали, мазки, профілі об'єктів різної конфігурації (різьблення, зуби) і тому подібне.



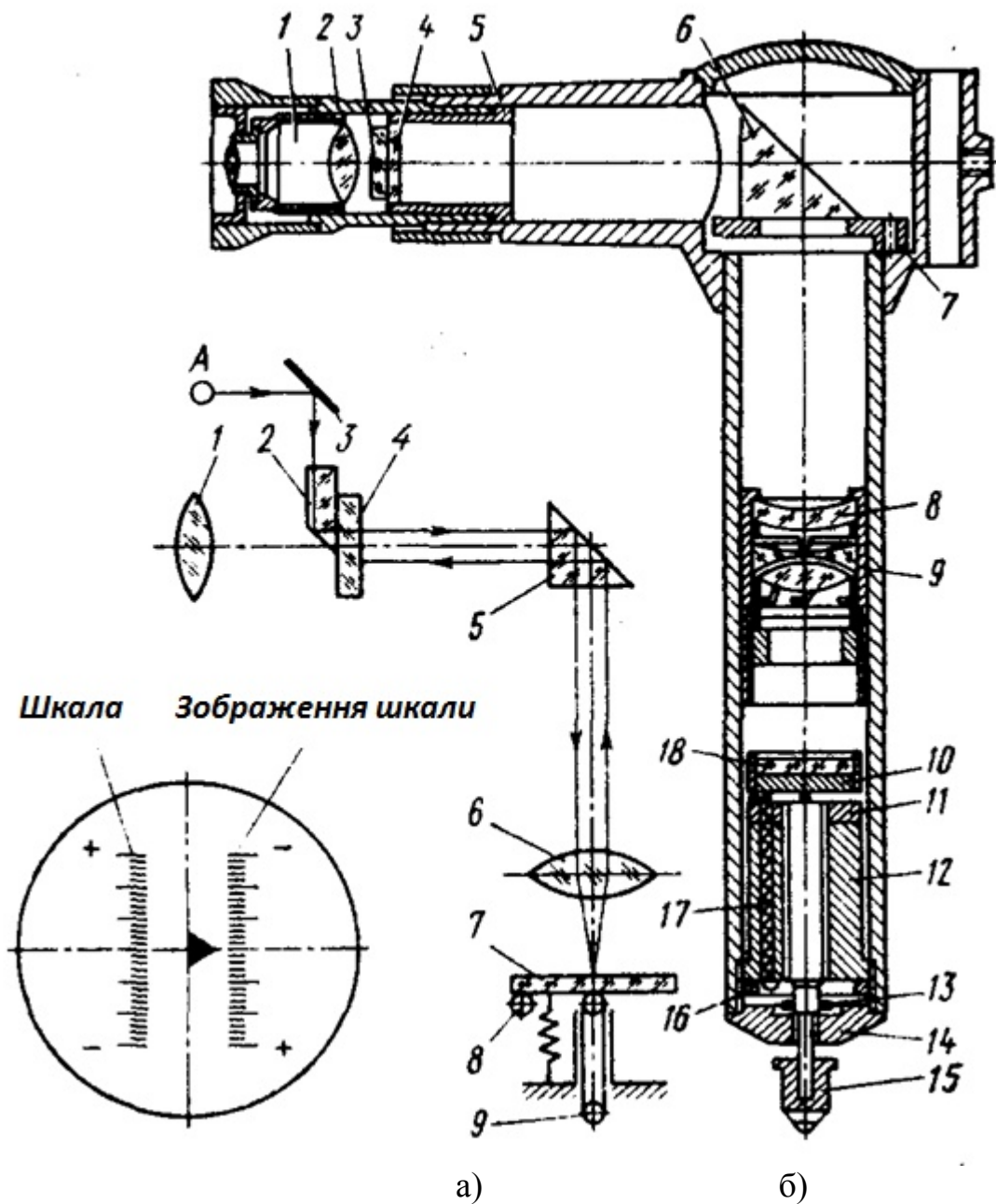


Рис. 2.4. Трубка окулярного оптиметра: *а* — схема; *б* — пристрій

Призма 5 повертає хід променів на  $90^\circ$  і дозволяє надати трубці зручну форму коліна. Світловий потік проходить через об'єктив і, відбившись від дзеркала 7, дає зворотне зображення автоколімації шкали в правій частині окулярної сітки, на якій нанесений показник, що відповідає схемі автоколімації, показаної на рис. 1.9,б. Дзеркало 7 притискається двома пружинами до кульок 8 і вимірювальному стрижню 9. При відхиленні дзеркала, викликаному переміщенням стрижня, зображення шкали на окулярній сітці зміщується щодо

показчика відповідно до схеми автоколімації, показаної на рис. 1.9,в. Збільшене зображення шкали спостерігається через окуляр 1.

У трубках оптиметров фокусна відстань  $l = 200$  мм, а довжина механічного важеля  $l = 5$  мм, що забезпечує передатне відношення  $S = 2f/l = 2 \cdot 200/5 = 80$ . Шкала оптиметра має число ділень  $C = 200$  з інтервалом ділень  $a = 0,08$  мм. Ціна ділення  $C = a/S = 0,08/80 = 0,001$  мм. Збільшення окуляра  $\Gamma = 12\times$  забезпечує зручне спостереження шкали. Видимий інтервал ділення шкали складає  $a' = agx = 0,08 \cdot 12 = 0,96$  мм. Межі вимірювань за шкалою  $\pm C\pi/2 = \pm (0,001 \cdot 200)/2 = \pm 0,1$  мм.

Усі деталі трубки оптиметра збирають і встановлюють в коліноподібній трубці (рис. 2.4, б). Вимірювальний стрижень з наконечником 15 і дзеркало 18, встановлене на підставі 10, збирають на втулці 12, яка закріплюється в трубці гайкою 16 із зовнішнім різьбленням. Підстава 10 притискається пружиною 17 до кульок на шайбі 11 і стрижню. Шайба 13 обмежує хід стрижня, упираючись в кришку 14. Лінзи 8 об'єктиву зібрані в трубці 9. Призма 6 встановлена на платі 7. Окулярна сітка 4, на якій фотографічним шляхом нанесені шкали і показник, і освітлювальна призма 3 закріплені в тубусі 5, який трьома радіальними гвинтами укріплений у втулці 2. На втулку за допомогою багатогодового різьблення нагвинчує окуляр 1, що дозволяє регулювати чіткість зображення шкали.

Вертикальний оптиметр ОВО-1 (рис. 2.5) є поєднанням трубки 2 оптиметра із стійкою типу С-Н. На трубку надітий аретир 5 для відведення вимірювального наконцевика 6. Трубка затискається гвинтом 4 в розрізній муфті кронштейна 11, який переміщається по колонці при обертанні кільця 13 і затискається гвинтом 12. Колонка запресована в стійку-підставку 14, на якій розташований робочий стіл 7. Горизонтальне положення столу встановлюють обертанням мікрогвинтів 8. У вертикальному напрямі стіл переміщують в межах декількох міліметрів обертанням гайки 10 мікрометричного механізму і фіксують гвинтом 9.

Перпендикулярність осі вимірювального стрижня площини столу перевіряють при надітому на стрижні плоскому вимірювальному наконечнику за допомогою плоскопаралельної кінцевої міри розміром приблизно 10 мм. Міру притирають до столу і, ослабивши гвинт 12, обертанням кільця 13 опускають кронштейн 11, поки наконцевик 6 не торкнеться міри. Момент торкання відзначають по переміщенню зображення шкали в окулярі 3. Люстерком 1 направляють світло в освітлювальну призму. Застопоривши кронштейн гвинтом 12, виконують низку вимірювань, встановлюючи міру щодо наконцевика в положеннях I, II, III і IV (рис. 2.6,а). Якщо площина наконечника не паралельна площині столу (рис. 2.6,б), то показання оптиметра при різних положеннях міри відрізнятимуться одне від іншого. Обертанням мікрогвинтів 8 (див. рис. 2.5) стіл встановлюють так, щоб у всіх чотирьох положеннях міри показання були однаковими.

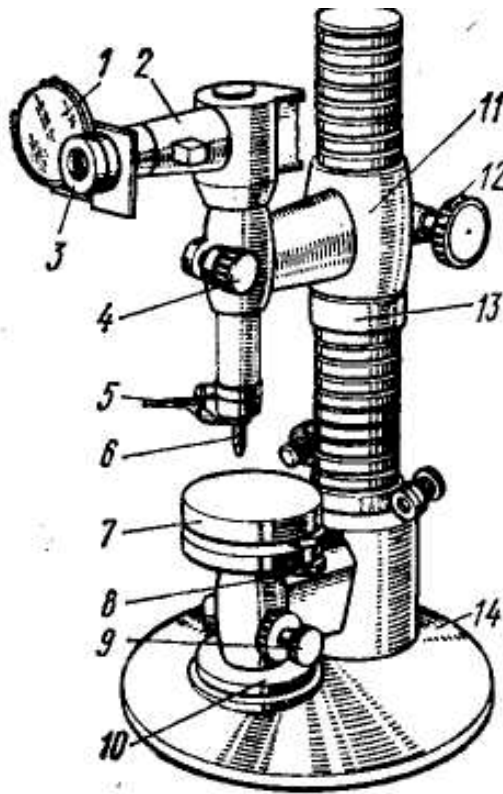


Рис. 2.5. Вертикальний оптиметр ОВО-1

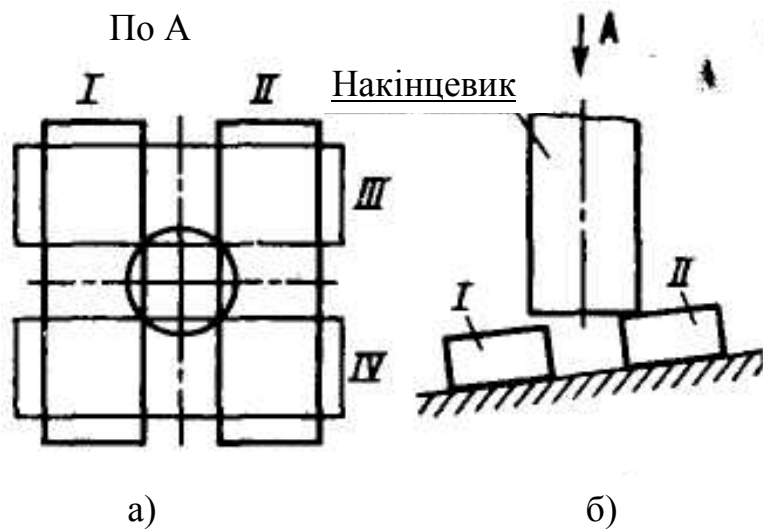


Рис. 2.6. Установлення столу перпендикулярно до осі вимірювального стрижня: *а* — положення мір на столі; *б* — установка стрижня

Оптиметр встановлюють на нуль (на розмір початкової міри) в наступному порядку. Міру заданого розміру притирають до столу з гладкою поверхнею. Стіл заздалегідь переводять в нижнє положення. Кронштейн 11 з трубкою 2 (рис. 2.5) плавно опускають до торкання без поштовху з поверхнею

міри. Обертанням кільця 13 встановлюють зображення шкали так, щоб нульовий штрих був декілька нижче показника, і кронштейн закріплюють гвинтом 12.

Налагодження приладу на нуль здійснюють, піднімаючи стіл обертанням гайки 10, і фіксують гвинтом 9. Налагодження на нуль перевіряють, піднімаючи і опускаючи аретиром вимірювальний накінцевик 2—3 рази. Якщо показання оптиметра не стабільні, то прилад знову налагоджують на нуль кільцем 13.

При вимірюваннях, піднявши наконечник аретиром, замінюють міру виробом. За показаннями оптиметра знаходять відхилення розміру виробу від розміру міри. Циліндричні вироби, наприклад гладкі калібро-проби, прокатують під вимірювальним наконечником; найбільше значення показання відповідає діаметру виробу у вимірюваному перетині.

Оптиметри комплектують змінними вимірювальними наконечниками. Сферичні наконечники використовують для вимірювання плоских і циліндрових виробів діаметром більше 10 мм, ножевидні наконечники — для циліндрових виробів діаметром менше 10 мм, плоскі наконечники — для сферичних виробів, наприклад кульок. Вимірювані вироби встановлюють або безпосередньо на робочий стіл, або на накладний стіл з ребристою поверхнею, який притирається до робочого столу. Площу ребристої поверхні легко довести до необхідної площинної, і вона менша, ніж гладка поверхня схильна до забруднень, що призводять до похибок значень.

### § 2.3.2. Вертикальний екранний оптиметр

Оптиметри ОВЕ є вдосконаленою моделлю оптиметра ОВО-1. Наявність екрану полегшує процес вимірювання і підвищує його продуктивність. У оптичній схемі екранного оптиметра (рис. 2.7,а) промені світла від лампи 1 через конденсор 2, світлофільтр 3, лінзу 4 і призму 5 освітлюють праву сторону скляної пластини 6, на яку нанесена шкала, розташована у фокальній площині об'єктиву 8. Між об'єктивом і пластиною знаходиться дзеркало 7, що змінює напрям ходу променів.

Після об'єктиву паралельні промені світла відбиваються від нерухомого 9 і що коливається 10 дзеркал і, зробивши зворотний шлях через об'єктив і дзеркало 7, дають зворотне зображення автоколімації шкали на лівій частині пластини 6 з покажчиком відліку.

Зображення шкали і покажчика проектується об'єктивом 11 через систему дзеркал 12, 13 і 15 на матовий скляний екран 14. Дзеркало 10 зв'язано механічним важелем з вимірювальним стрижнем приладу. У оптиметрів ОВЕ-1 кут між дзеркалами 9 і 10 складає  $37^{\circ}30'$ , і промені світла відбиваються від дзеркала, що коливається, один раз, тому чутливість приладу така ж, як у оптиметрів ОВО-1.

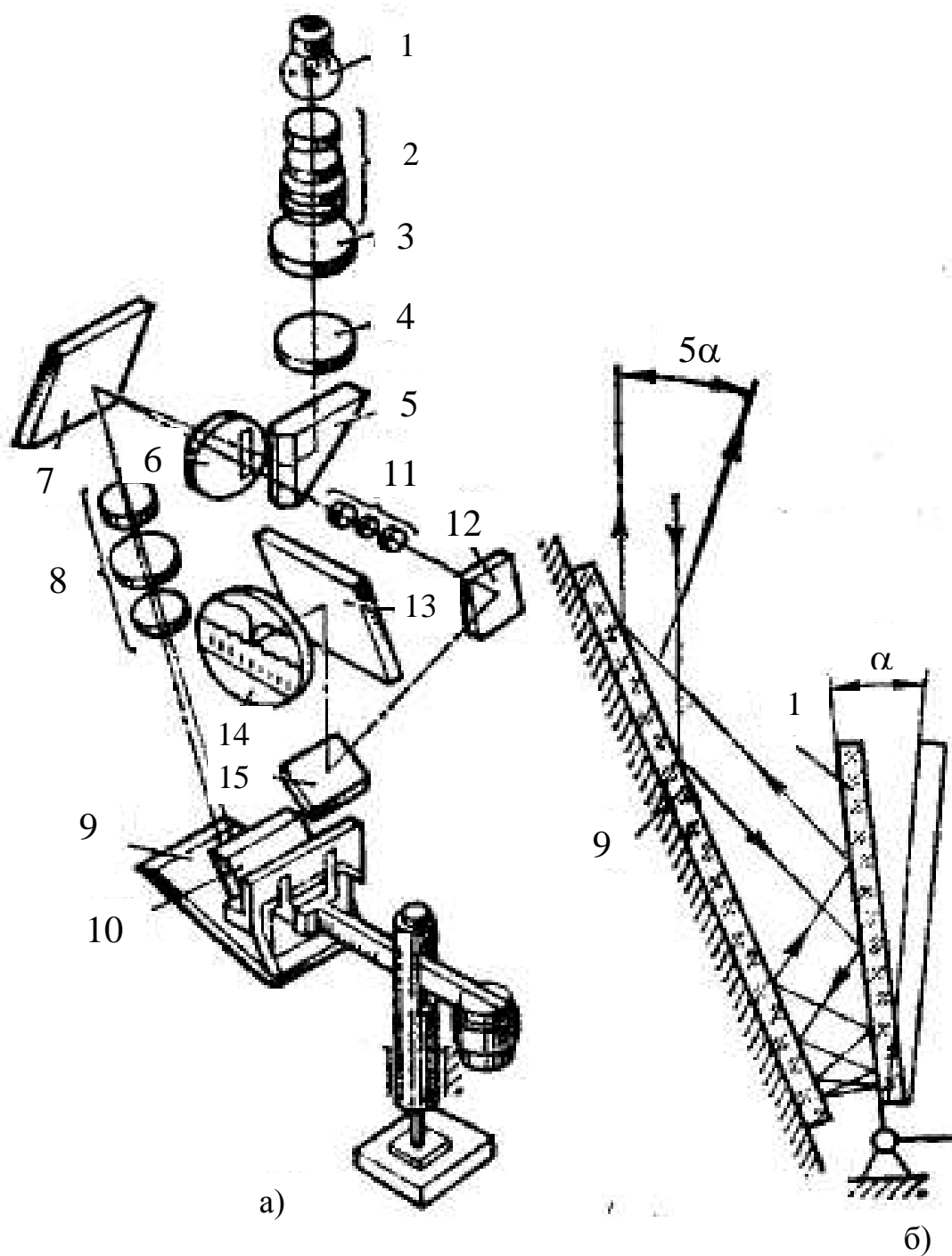


Рис. 2.7. Оптичні схеми екранних оптиметрів: а — оптиметр ОВЕ-1; б — оптиметр ОВЕ-02

У оптиметрів ОВЕ-2 — ультраоптиметрів — кут між дзеркалами 9 і 10 складає  $15^\circ$ , що забезпечує багатократне віддзеркалення променів від дзеркала, що коливається (рис. 2.7,б). Внаслідок багатократного віддзеркалення досягається велике результуюче відхилення променів від дзеркала 10. Тому

передавальне відношення оптичної системи більше, а ціна ділення шкали оптиметра ОВЕ-02 менша, ніж у оптиметра ОВЕ-1.

Оптиметр ОВЕ-1 (рис. 2.8,а) складається з вимірювальної головки 2 з освітлювальною системою 1. Всі оптичні частини приладу розміщені усередині корпусу на передній частині якого встановлений екран, захищений від зовнішнього світла блендою 3. Головка закріплена гвинтом 5 в кронштейні 4 стійки С-П. Положення столу 6 з ребристою поверхнею регулюють маховичками 7 і фіксують гвинтами 8. Упор 9, закріплений в державці 10, використовують для перевірки партій сферичних і циліндрових виробів однакового розміру. На столі 6 є різьбові отвори для кріплення накладних столів і пристосувань. Для вимірювання виробів, встановлення яких на стіл з ребристою поверхнею утруднена, наприклад калібрів-пробок і кульок, використовують стіл СТ-6 з гладкою поверхнею.

Оптиметр ОВЕ-02 (рис. 2.8,б) має стійку, яка складається з жорсткої литої підстави 1 і призматичної колонки 2. Кронштейн 3 переміщається по тих, що направляють колонки за допомогою кремальєри і стопориться гвинтами 4. Головка 5 оптиметра кріпиться в кронштейні гвинтами 6. Робочий стіл 7 з ребристою поверхнею можна переміщати у вертикальному напрямі гвинтом 9 мікроподач і стопорити у встановленому положенні гвинтом 8.

### **§ 2.3.3. Горизонтальний окулярний оптиметр**

Горизонтальний оптиметр ОГО-1 (рис. 2.9, а) дозволяє вимірювати зовнішні розміри до 350 мм, зовнішні діаметри до 225 мм і внутрішніх діаметрів до 150 мм. Внутрішні вимірювання у межах від 1 до 13 мм виконують за допомогою головки електроконтакта ГК-3, а понад 13,5 мм — за допомогою пристосування ІП-3. На масивній підставі 1 закріплені горизонтальні направляючі 2, по яких переміщаються і фіксуються в потрібному положенні кронштейни 3. У кронштейнах гвинтами 7 затиснуті піноль 4 і трубка 12 оптиметра.

Виріб встановлюють на стіл 11 між вимірювальними наконечниками 9, закріпленими на стрижнях пінолі і трубки. Стрижень пінолі переміщають мікрогвинтом 5 і фіксують гвинтом 6. Стіл 11 має механізм для переміщення в трьох взаємно перпендикулярних напрямках і для обертання навколо поперечної горизонтальної і вертикальної осей. Вертикальне переміщення столу виконують обертанням ручки 19, обмежують гвинтом 14 і фіксують гвинтом 18.

Поперечне переміщення столу здійснюють обертанням гвинта 13. У подовжньому напрямі вільно переміщається тільки накладна верхня частина столу, встановлена на кулькових опорах.

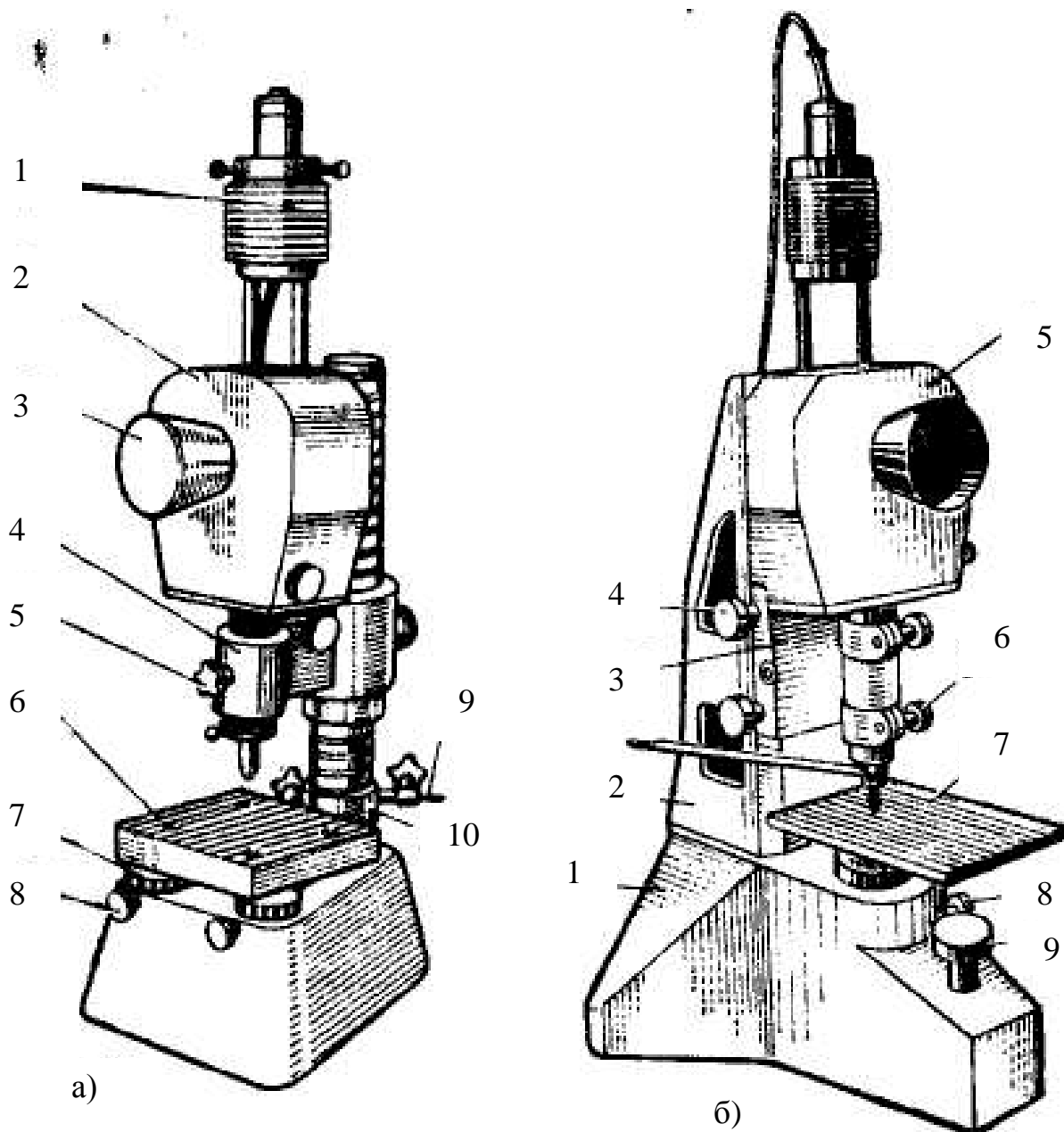


Рис. 2.8. Екранні оптиметри: а - ОВЕ-1; б – ОВЕ-02

Навколо вертикальної осі стіл повертають ручкою 20. Похитування щодо поперечної горизонтальної осі здійснюють ексцентриком 17. У встановленому положенні стіл фіксують гвинтом 15. Вертикальний штатив 10 служить для установки пристосувань, наприклад упору при перевірці серії виробів однакового розміру або головки електроконтакта ГК-3. Регулювальними гвинтами 16 встановлюють стійку в горизонтальне положення по рівню.

Перед вимірюванням взаємне положення наконечників регулюють так, щоб осі стрижнів пінолі і трубок знаходилися на одній прямій. Для цього між наконечниками на столі встановлюють кінцеву міру розміром від 0,5 до 2 мм.

Переміщаючи кронштейни 3 і піноль 4, накінцевики приводять у зіткнення з поверхнями міри.

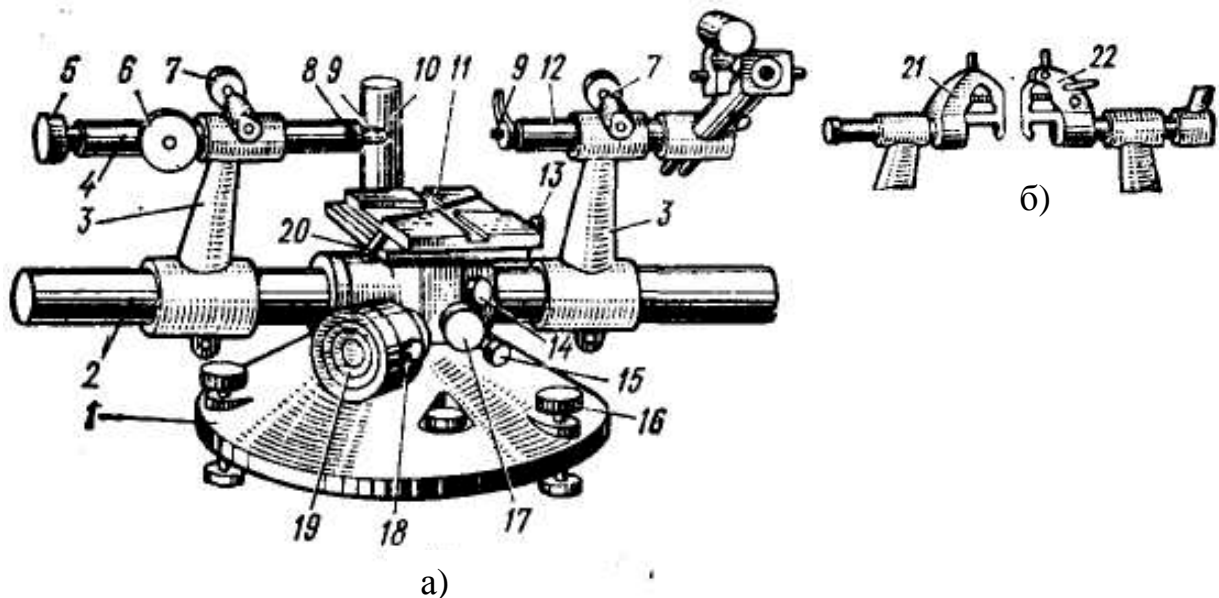


Рис. 2.9. Горизонтальний оптиметр ОГО-1: а — пристрій; б — із застосуванням ИП-3

Мікрогвинтом 5 встановлюють шкалу оптиметра на деяке показання. Регулювання виконують гвинтами 8, розташованими під кутом  $90^\circ$ , які зміщують стрижень пінолі в радіальних напрямках. Обертаючи викруткою по черзі гвинти 8, добиваються найбільшого показання оптиметра для сферичних наконечників і найменшого показання для плоских.

При встановленні оптиметра на нуль по блоку кінцевих мерів довжини лінія вимірювання повинна проходити перпендикулярно до вимірювальних граней мір. Робочий стіл з блоком мір і кронштейни встановлюють в положення, при якому вимірювальні наконечники пінолі, і трубки стикаються в серединній крапці мір. Мікрогвинтом 5 встановлюють шкалу приладу в положення біля нульової крапки. Почерговими поворотами столу навколо вертикальної осі ручкою 20 і похитуваннями столу ексцентриком 17 добиваються найменшого показання оптиметра. Потім, обертаючи гвинт 5 пінолі, встановлюють шкалу на нульове положення. Відводячи наконечник трубки аретиром, перевіряють правильність встановлення нульового положення.

При вимірюванні зовнішніх розмірів встановлення виробу в правильне положення по відношенню до лінії вимірювання здійснюють декількома способами залежно від форми виробу.

1. Вимірювання розмірів плоскопаралельних виробів, наприклад



перевірку кінцевих мерів довжини, виконують так само, як встановлення оптиметра на нуль. Поворотами і нахилами столу добиваються найменших показань оптиметра, які відповідатимуть відхиленню від довжини настановної міри. При цьому лінія вимірювання перпендикулярна до паралельних площин виробу.

2. При вимірюванні зовнішніх діаметрів циліндрових виробів, наприклад калібр-пробок, лінія вимірювання повинна перетинати вісь виробу під прямим кутом. Циліндр слід встановлювати так, щоб його вісь була паралельна або вертикальна поверхні столу.

У першому випадку після встановлення оптиметра на нуль по блоку кінцевих мір вимірювальний наконечник трубки оптиметра відводять аретиром, міри знімають, стіл опускають вниз, і виріб закріплюють на столі в горизонтальному положенні за допомогою струбцини. Потім стіл встановлюють у положення, за яким вимірювальні наконечники торкаються циліндра по діаметру. Для цього ручкою 19 (див. рис. 2.9) переміщують стіл у вертикальному положенні, щоб мати найбільші показання за шкалою оптиметра. При цьому лінія вимірювання повинна перетинати вісь виробу.

Потім поворотами столу ручкою 20 добиваються найменших показань оптиметра, при яких вісь виробу є перпендикулярною осі вимірювання. Оскільки попередня установка при цьому може бути порушена, вимірювання повторюють і продовжують доти, доки найбільше показання при переміщенні столу не співпадає з найменшим показанням при повороті.

Якщо циліндр ставлять на стіл так, що його вісь перпендикулярна до площини столу, то стіл переміщують в поперечному напрямі перпендикулярно до осі вимірювання, обертаючи гвинт 13, і похитують стіл ексцентриком 17. Найбільше показання при переміщенні повинне співпасти з найменшим показанням при похитуванні.

3. При вимірюванні кульок лінія вимірювання повинна проходити через центр сфери. Стіл переміщують у вертикальному і поперечному напрямках до тих пір, поки найбільші показання оптиметра при цих операціях не співпадуть.

Внутрішні розміри виробів (калібр-кілець, скоб тощо) на горизонтальному оптиметрі вимірюють за допомогою пристосування ИП-3, яке складається з двох майже однакових дуг 21 і 22, що надягають на пінюль і трубіці оптиметра (рис. 2.9, б).

На стрижні пінолі і трубки при цьому встановлюють плоскі наконечники. Дуга, яку надягають на трубку оптиметра (рис. 2.10), складається з кронштейна 4 і сережки 1, що є П-образний важелем з вимірювальним наконечником 13 на кінці.

Сережка кріпиться гвинтом 3 на осі 2, яка повертається на шарикоподшипникових опорах кронштейна 4. Кронштейн надягають на трубку 8 оптиметра до упору в різьбове кільце 10, положення якого у втулці кронштейна фіксується гвинтом 9. Пружина 6 через захоплення 7 притискує

кульку 12 сережок 1 до плоского наконечника 11 трубок. Відведення сережки здійснюють важелем 5 аретира.

Положення кронштейна на трубці перевіряють настановним калібром 14. Калібр упирають у втулку кронштейна. Якщо показання оптиметра виходять за межі  $\pm 5$  мкм або зображення шкали не переміщається в полі зору, то звільняють стопорний гвинт 9 і, користуючись зворотною стороною настановного калібру 14 як торцевим ключем, регулюють положення різьбового кільця 10.

Перед вимірюванням внутрішніх розмірів оптиметр (рис. 2.10) встановлюється на нуль по блоку кінцевих мір з притертими боковиками або по атестованому кільцю.

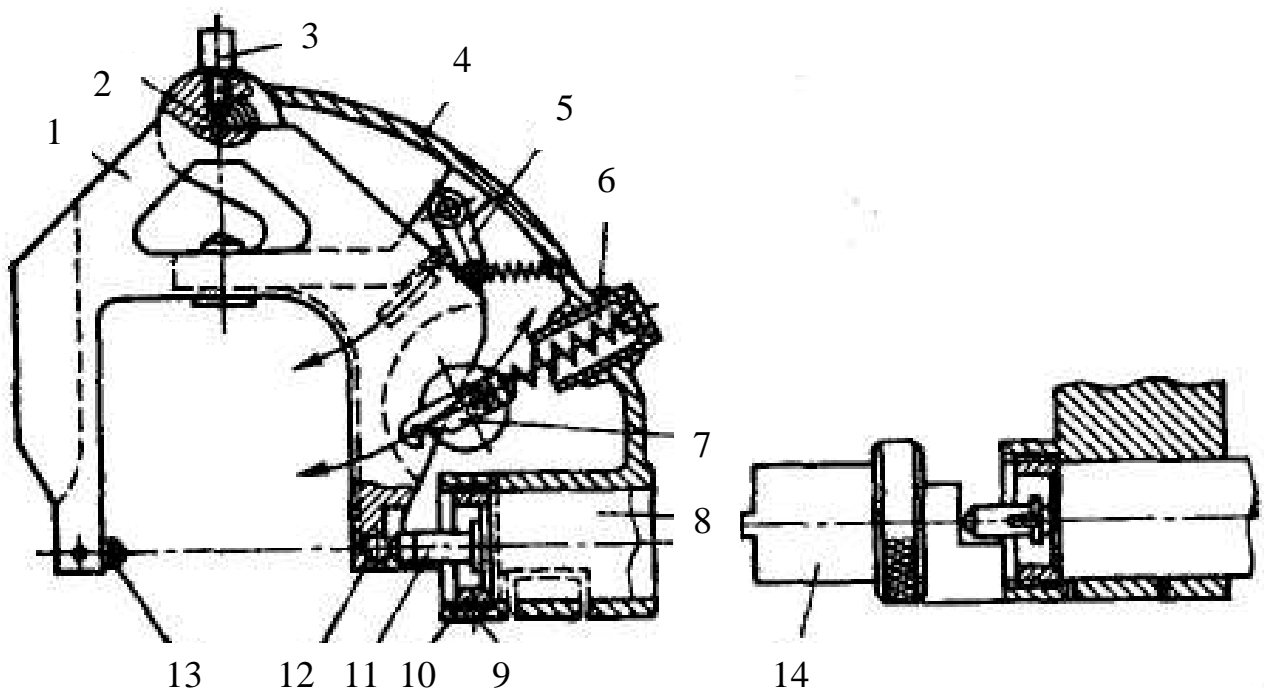


Рис. 2.10. Пристосування для вимірювання внутрішніх розмірів

Послідовність переміщень столу при установці на розмір по блоку мір і вимірюванні калібр-скоб така ж, як при вимірюваннях зовнішніх розмірів виробів з плоскими поверхнями. При вимірюваннях внутрішніх діаметрів виробів і встановленню на нуль по кільцю стіл переміщають так само, як при вимірюваннях зовнішніх циліндрів.

## § 2.4. Інтерферометри

Більшість оптичних поверхонь контролюється за допомогою пробних стекол. Проте метод пробного скла не забезпечує підвищеної точності контролю й вимагає безпосереднього контакту еталонної й контрольованої поверхонь, що в деяких випадках не припустимо. Тому в оптичному приладобудуванні поряд із пробними стеклами застосовують різні інтерферометри, які з підвищеною точністю контролюють поверхні безконтактним способом.

### § 2.4.1. Інтерферометри для контролю площини

Більшість інтерферометрів цієї групи побудовано на принциповій схемі інтерферометра Фізо. На рис. 2.11 наведена принципова схема й поле зору інтерферометра ИКП-2.

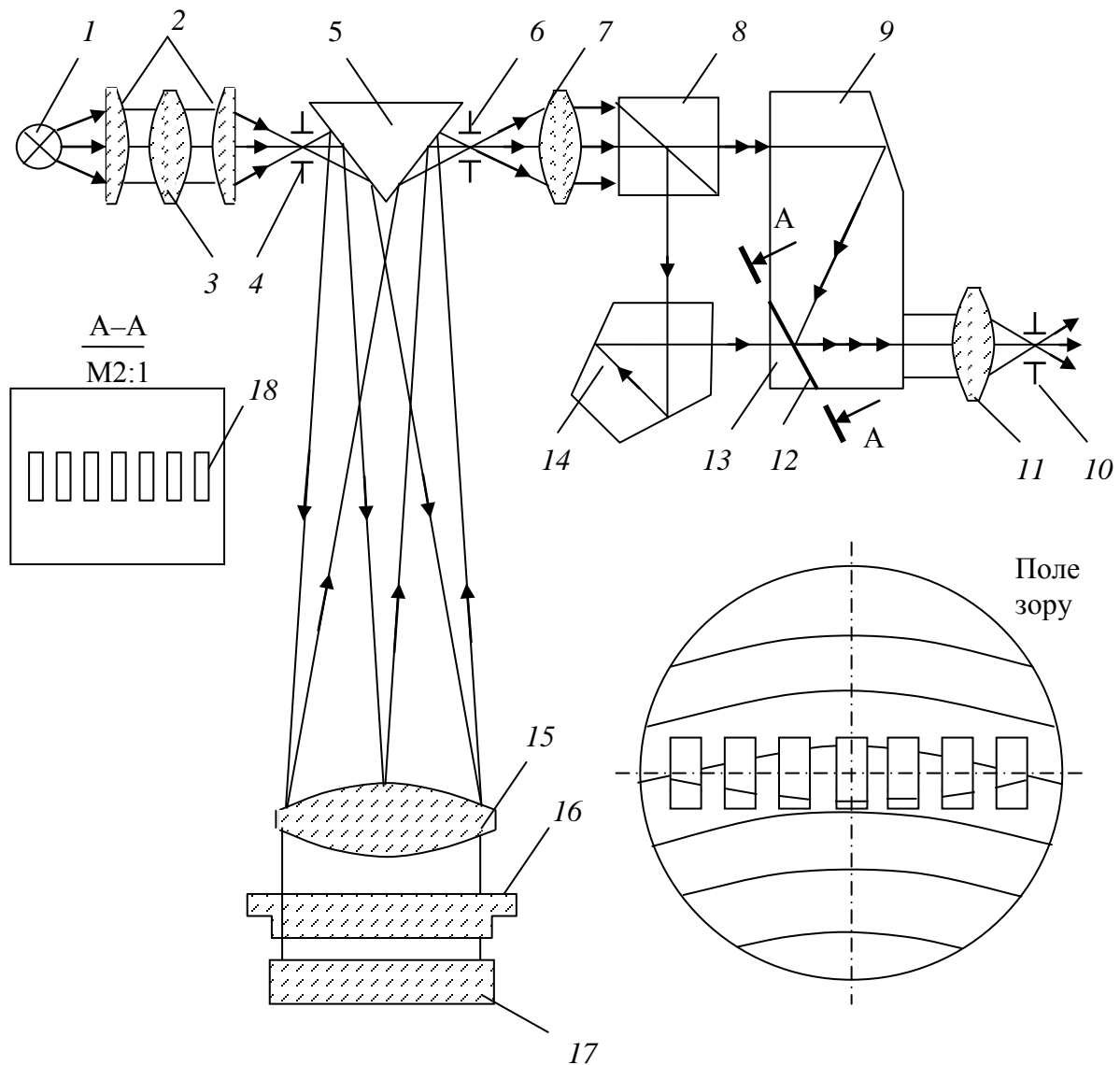


Рис. 2.11. Оптична схема інтерферометра ИКП-2

Джерело світла 1 конденсором 2 з убудованим світлофільтром 3 проектується на діаграму 4, що має роль вхідної зіниці інтерферометра. Діаграма встановлена у фокальній площині об'єктива 15 коллиматора. Інтерферуючі промені відбиваються від нижньої еталонної площини злегка клиноподібної пластини 17. Остання встановлена на робочому столі й може переміщатися й нахилятися щодо еталона.

Неплощинність контрольованої поверхні щодо еталонної поверхні вимірюється величиною скривлення смуг рівної товщини, локалізованих на контрالیруемой поверхні. Інтерферуючі промені збираються у вихідних зіницях у фокальній площині 6 об'єктива 15. Призма 5 із дзеркальними катетними гранями необхідна в автоколлімаційній системі для просторового поділу вхідної й вихідної зіниць. Вихідні зіниці перебувають у передній фокальній площині лінзи 7, а в паралельному ході променів між лінзами 7 й 11 установлений блок призм ускладненого відлікового пристрою. Остаточне зображення вихідних зіниць утвориться в задній фокальній площині лінзи 11 на діафрагмі 10, за якої безпосередньо перебуває око спостерігача.

У блоці призм створюється два взаємно повернутих зображення інтерференційних смуг. Блок складається із призми-куба 8, пентапризми 14 й особливою призми 9, у площині склейки якої із клином 13 нанесені дзеркальні покриття у вигляді прямокутних ділянок 18. Інтерференційна картина з контрольованої поверхні проектується в площину 12, сполучену із дзеркальними покриттями. Із цією картиною смуг сполучений передній фокус лінзи 11, що виконує роль окуляра.

Основна картина смуг (на поле зору опуклістю нагору) утворена променями, що проходять через пентапризму повз дзеркальні прямокутники 18. Додаткова картина звичайно має вигляд однієї переривчастої переверненої смуги (на поле зору опуклістю вниз) і утвориться променями, що пройшли призму-куб і відбиті дзеркальні прямокутники.

Блок призм можна переміщати поперек оптичної осі з метою взаємного зсуву основної й додаткової картин.

На схемі рис. 2.11 не показана поворотна призма Аббе, за допомогою якої інтерференційні смуги орієнтуються уздовж ряду дзеркальних прямокутників.

При вимірах контрольовану деталь розташовують на столі таким чином, щоб зазор між пластинами 16 й 17 був дорівнює 1—2 мм.

Спочатку блок призм установлюють у таке положення, коли збігаються краю перевернутих зображень смуги (див. поле зору на рис. 2.11). Потім сполучають середини смуг і таким чином вимірюють стрілку прогину смуги.

У даному відліковому пристрої підвищена чутливість візуального виміру, оскільки, власне кажучи, вимірюється подвоєна стрілка прогину. Атестація приладу показала, що похибка виміру скривлення смуги в ИКП-2 не перевищує 0,02 смуги при контролі площин діаметром до 100мм.

Пластину 16 роблять клинчастою для того, щоб пучок променів, відбитий від її верхньої поверхні, не попадав у систему спостереження й не знижував контрасту смуг. Звичайно кут клина становить  $1\text{--}2^\circ$ . Такий шлях виключення дії нижньої поверхні пластини 17 найчастіше непридатний. Рекомендується змазувати цю поверхню вазеліном із сажею й тим самим зменшувати відбиття світла й збільшувати поглинання відбитого світла.

В якості об'єктива 15 цілком припустиме використання одиночної плоскоопуклої лінзи. Її сферична аберація викликає скривлення смуг, значно менше 0,01 смуги, якщо товщина зазору між пластинами 16 й 17 не перевищує 1 мм. До того ж її розташування опуклістю до пластин дає мінімальну дисторсію при спостереженні смуг.

За схемою Фізо виготовлені інтерферометри ИТ-40, ИТ-100., ИТ-70 й ИПП-15 з еталонними пластинами діаметром відповідно 200, 100, -70 й 150 мм. В інтерферометрі ПК-452 з діаметром пластини 280 мм застосований дзеркальний, об'єктив коліматора.

Інтерферометри ИТ-40 й ИТ-70 мають по дві еталонні пластини, причому на одній з них немає покриття, а на іншій нанесене металеве дзеркальне покриття з коефіцієнтом пропущення  $8\text{--}10\%$ . Останню використовують для спостереження багатопроменевої інтерференції при контролі поверхонь із коефіцієнтами відбиття  $20\text{--}98\%$ . Ці ж інтерферометри споряджені гвинтовими окулярними мікрометрами для виміру скривлення смуг, а також фотокамерами. Прилад ИТ-70 працює зі збільшеннями 1, 2,7 й  $6^x$ , що дозволяє контролювати з високою точністю поверхні досить малого діаметра (до 1 мм).

#### § 2.4.2. Інтерферометри для контролю сфер

Прилади цієї групи будують також за принциповою схемою інтерферометра Фізо. Проте пластина, у якій локалізовані смуги рівної товщини, обмежена тут двома сферами, тому освітлювати її треба збіжними або розбіжними пучками променів по нормалях до поверхонь.

На рис. 2.12 показана оптична схема інтерферометра для контролю опуклих сфер. Ахроматичне джерело світла 1 за допомогою конденсора 2 висвітлює діафрагму 3 (вхідна зіниця інтерферометра  $L$ ). Об'єктив 6, показаний тільки своєю головною площиною, переносить вхідну зіницю в крапку  $L'$ .

Із цією крапкою сполучений центр кривизни  $Z_1$  еталонної сфери  $П_1$  меніска 7 і центр кривизни  $Z_2$  контрольовані сфери  $П_2$  лінзи 8. У цьому випадку товщина повітряного зазору постійна, промені світла направляються по нормалях до поверхонь  $П_1$  і  $П_2$ , відбиті пучки мають загальна, вихідна зіниця  $L'$  й у зазорі локалізується нескінченно широка смуга.

Вихідна зіниця  $L'$  переноситься об'єктивом 6 за допомогою світлоподільвача 4 у крапку  $L''$ , де й спостерігається в окуляр 5. Зазначене сполучення вихідних зіниць  $L_1'$  й  $L_2''$  (тобто центрів кривизни відбитих пучків у одній крапці  $L_1'$ ) досягається при налаштуванні приладу переміщеннями лінзи 8.

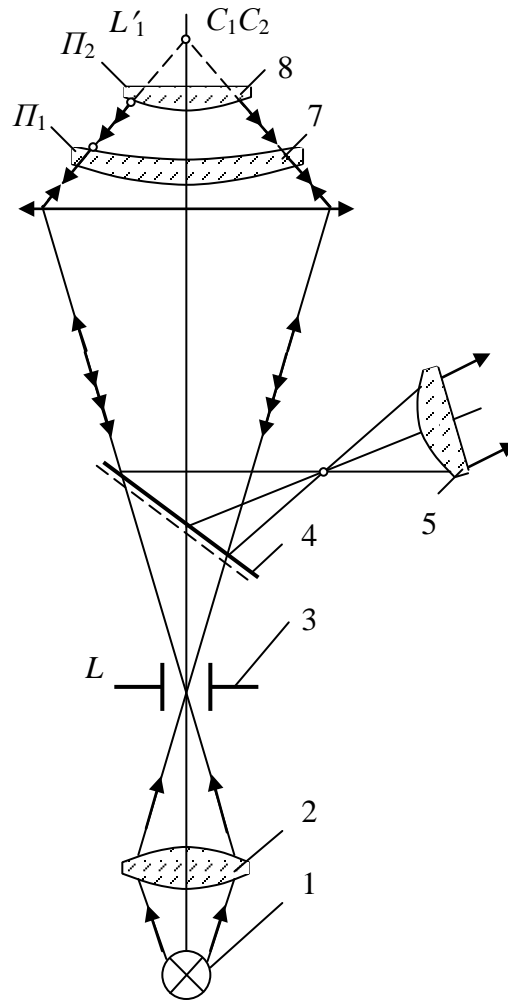


Рис. 2.12. Інтерферометр для контролю опуклих сфер

Інтерференційні смуги рівної товщини спостерігають при вибраному окулярі 5 або безпосередньо оком із точки  $L_1''$ , або за допомогою телескопічної лупи.

Розглянемо, до чого призводить розбіжність вихідних зіниць  $L_1'$  й  $L_2''$ , а також відповідних хвильових фронтів  $W_1$  й  $W_2$ .

Нехай лінза 8 зміщена уздовж оптичної осі на малий відрізок  $a/2$  (рис.2.13,а). Тоді вихідні зіници  $L_1'$  й  $L_2''$  розведені на відстані  $a$  і на поверхні лінзи видно  $k$  інтерференційних кілець:

$$k = \frac{a}{8\lambda} \left( \frac{D}{R} \right)^2, \quad (2.1)$$

де  $D/R$  — діючий відносний отвір контрольованої поверхні.

При  $D/R = 1$  й  $\lambda = 0,5$  мкм поява одного кільця зв'язано зі зсувом лінзи на відрізок  $a/2 = 2$  мкм. У цих умовах чутливість переміщення лінзи повинна бути

не гірше 0,2 мкм, для того, щоб можна було регулювати кривизну смуг з похибкою до 0,1 смуги.

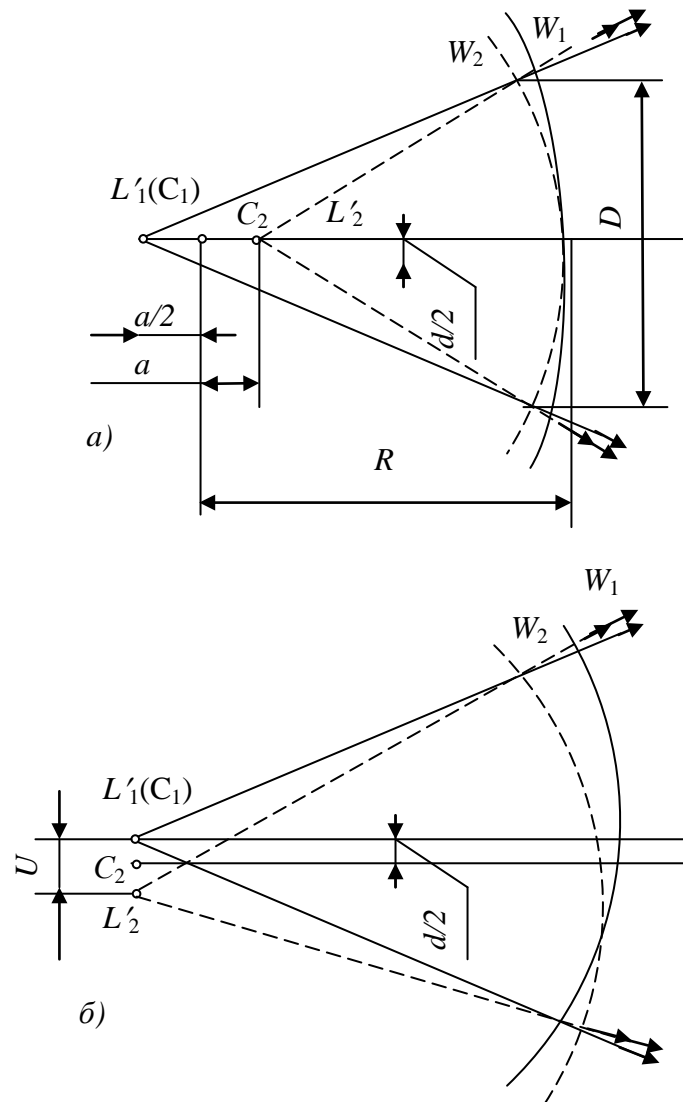


Рис. 2.13. Розведення вихідних зіниць: а - уздовж оптичної осі, б - поперек оптичної осі

Нехай тепер лінза 5 (див. рис. 2.12) зміщена поперек оптичної осі на малий відрізок  $a/2$  (рис. 2.13,б). На поверхні лінзи спостерігається  $k$  прямих смуг:

$$k = \frac{a}{\lambda} \left( \frac{D}{R} \right)^2. \quad (2.2)$$

Якщо  $D/R = 1$ , а також  $\lambda = 0,5$  мкм, то до появи однієї смуги призводить зсув лінзи на відстань  $a/2 = 0,25$  мкм. Отже, для регулювання ширини смуг

механізми поперечних переміщень лінзи також повинні мати надзвичайно високу чутливість і твердість конструкції.

Більшу партію лінз контролюють за допомогою зразкової лінзи точно відомого радіуса  $R_0$ . По цій лінзі інтерферометр набудовують на нескінченно широку смугу, а потім на посадкове кільце кладуть по черзі контрольовані лінзи й вимірюють числа кілець  $k$ . Різниця радіусів кривизни  $\delta R = R - R_0$  можна знайти за умови  $\delta R = a/2$ . Для точних вимірів вноситься виправлення на глибину посадки лінз на кільце діаметром  $D_0$ , звідки

$$\delta R = \frac{4k\lambda}{1 + D_0^2/8R^2} \left( \frac{R}{D} \right)^2. \quad (2.3)$$

Похибка виміру числа кілець  $k$  не перевищує 0,5—1, що при  $D/D_0 = 1$  відповідає похибці визначення  $\delta R$ , рівної 1-2 мкм.

Місцеві відхилення форми поверхні при спостереженні кілець важко помітні. Для їхнього виміру рекомендується переміщеннями лінзи перенастроїти інтерферометр на спостереження смуг, близьких до прямих, і по їхньому скривленню оцінювати місцеві відхилення форми. У цьому випадку похибка вимірів буде не вище 0,1 смуги.

Ртутна лампа дає картину достатнього контрасту при повітряному проміжку товщиною до 15 мм. Це означає, що одним еталонним меніском можна контролювати поверхні, радіуси яких відрізняються не більше ніж на 15 мм. Якщо ж у комплект приладу входить кілька менісків, то діапазон значно розширюється. Граничні значення радіусів кривизни й діаметрів контрольованих опуклих сфер визначаються робочим відрізком об'єктива 6 (див. рис. 3.23) і його відносним отвором.

За схемою 2.12 виготовлені експериментальні зразки інтерферометрів, наприклад таких, як ИТ-154. На приладі КЮ-210 контролюють опуклі сфери в широкому діапазоні радіусів кривизни (10-335) мм. Для цього використовують п'ять змінних об'єктивів з відносними отворами від 1:1,2 до 1:5,8 й 26 змінних менісків.

Для контролю увігнутих сфер у схемі застосований негативний об'єктив 1, що дає розбіжний гомоцентричний пучок, і меніск 2 з еталонною опуклою сферою (рис. 2.14,а). За допомогою чотирьох змінних об'єктивів з відносними отворами від 1:1,1 до 1:4,5 і двадцяти змінних менісків контролюють увігнуті сфери 3 з радіусами кривизни 80—346 мм.

Інтерферометр ИТ-154 —прилад для контролю опуклих сфер у невеликому діапазоні радіусів кривизни (10—51 мм), але з більшими кутами охвата (до  $140^\circ$ ).

Прилад має один складний об'єктив з відносним отвором 1:0,53 і три змінних меніски.

Об'єктив виконаний за схемою мікрооб'єктива й містить дев'ять лінз із діаметрами 97—258 мм.



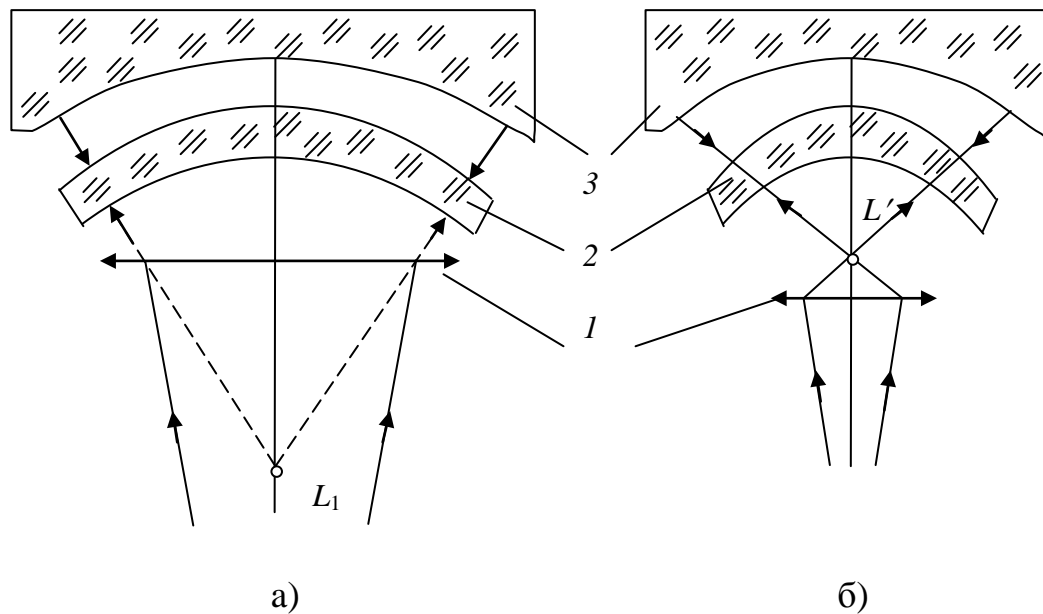


Рис. 2.14. Інтерференційні схеми контролю ввігнутих сфер: а - з більшими радіусами кривизни, б - з малими радіусами кривизни

Дуже більша складність виготовлення об'єктива обмежує застосування інтерферометрів ИТ-154. При контролі ввігнутих сфер малих радіусів кривизни негативний об'єктив замінюють на позитивний мікрооб'єктив великої апертури, що створює дійсна вихідна зіниця  $L'$  (рис. 2.14,б). За зазначеною схемою були виготовлені експериментальні зразки інтерферометрів КЮ-211 й ИТ-148. Останній має один мікрооб'єктив з апертурою 0,95 і за допомогою чотирьох змінних менісків контролює ввігнуті сфери з радіусами кривизни 13-60 мм при куті охоплення  $140^\circ$ .

### § 2.4.3. Інтерферометри для контролю асферичних поверхонь

На рис. 2.15 показані дві принципові схеми інтерферометрів. В обох випадках використовується змінена схема інтерферометра Майкельсона, що містить в одному з плечей автоколлімаційну систему з контрольованою поверхнею.

Принцип дії першої заснований на використанні анаберрационных крапок (фокусів) що відбивають асферических поверхонь другого порядку. На рис.2.15,а наведено схему контролю опуклого гіперболоїда. У вихідній зіниці інтерферометра 10 у найпростішому випадку перебуває око спостерігача. Фокусування на вихідну зіницю здійснюється об'єктивом 9.

Анаберрационность фокусів  $F_1$  й  $F_2$  асферической поверхні означає, що крапкове джерело світла, поміщений у крапку  $F_2$ , ідеально зображується в іншому фокусі  $P^*$ , що є центром сферичної хвилі.

Якщо випробувана поверхня 7 має ідеальну форму, а центр кривизни  $Z$  сферичного дзеркала 8 і задній фокус  $F'$  об'єктива 6 сполучені з геометричними фокусами  $F_1$  й  $F_2$ , то хвильовий фронт хвилі, що виходить із робочої галузі, повинен бути плоским. Плоска хвиля з робочої галузі інтерферує з плоскою еталонною хвилею й утвориться картина смуг рівної товщини. По виду цих смуг судять про якість асферической поверхні.

По першій схемі побудований експериментальний зразок інтерферометра ИКП-1. Як монохроматичне джерело світла в ньому використовуються натрієва (ДНас-18) або ртутна (ДРС-50) лампи. Після діафрагми 2, об'єктива 3 і напівпрозора пластини 5 світло від джерела / попадає на об'єктив 6.

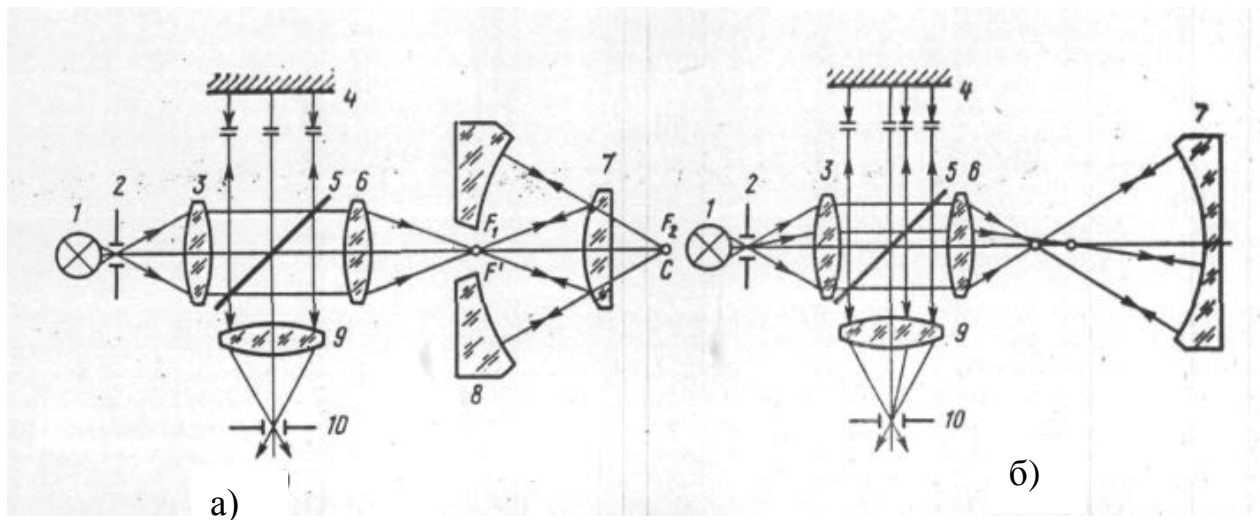


Рис. 2.15. Принципові схеми інтерферометрів для контролю асферических поверхонь: а — методом анаберраційних крапок; б — компенсаційним методом

Об'єктив 6; що створює гомоцентрический пучок променів, добре корригирован на сферичну аберацію й умову синусів для лінії  $D$  натрію ( $\lambda = 589,3$  нм) і для лінії  $e$  ртуті ( $\lambda = 546,1$  нм). У комплекті приладу є чотири об'єктиви аналогічної конструкції з апертурами 0,5; 0,4; 0,3 й 0,2; діаметри зіниць входу у всіх об'єктивів рівні 20 мм.

Промені світла двічі відбиваються від контрольованої поверхні деталі 7, у наслідок чого чутливість інтерференційного методу підвищується вдвічі. Разом з тим подвійне відбиття може значно зменшити інтенсивність робочого пучка й контраст картини, тому на контрольовану поверхню необхідно наносити дзеркальне покриття.

У приладі передбачені пристрої для юстировочного повороту й переміщення основного блоку (деталі 7 і дзеркала 8), дзеркала 4 і поступальне переміщення об'єктива 6. При незначних схемних перебудовах прилад дозволяє контролювати опуклі й увігнуті еліптичні, гіперболічні й параболічні

поверхні діаметром до 250мм із відносним отвором 1:1,3 з похибкою виміру не вище 0,2 мкм.

Засади дії другої схеми (рис. 2.15,б) полягають у застосуванні компенсаційного методу. У робочій галузі інтерферометра встановлений компенсаційний об'єктив 6. З його допомогою плоский хвильовий фронт перетвориться у хвильовий фронт, що збігається з теоретичним профілем контрольованої поверхні. Після відбиття й вторинного проходження через компенсаційний об'єктив хвильовий фронт знову стає плоским. Інша частина інтерферометра працює за попередньою схемою.

Збіг скомпенсованого фронту хвилі й профілю контрольованої поверхні можливо в тому випадку, якщо всі промені, що виходять із компенсаційного об'єктива, збігаються з нормаллями до поверхні. Цей збіг дотримується тоді, коли сферична аберація об'єктива дорівнює поздовжньої аберації нормаллі до контрольованої поверхні.

Інтерферометр із компенсатором дає можливість контролювати асферические поверхні будь-якого порядку. Навіть у тих випадках, коли не вдається підібрати ідеальний компенсаційний об'єктив, можна заздалегідь розрахувати вид інтерференційної картини при наявному об'єктиві й ідеальній асферической поверхні, а потім зрівняти розрахункову й реальну картини. Розходження картин покаже відхилення форми контрольованої асферической поверхні від ідеальної.

Схема рис. 2.15,б реалізована в інтерферометрі ИКАП-1. Діаметр контрольованих на цьому приладі ввігнутих поверхонь не може перевищувати 450мм, а опуклих - 150 мм.

#### **§ 2.4.4. Інтерферометри для виміру висоти мікронерівностей або слідів обробки**

Мікроінтерферометр МИИ-4 (мікроінтерферометр Лінника) (табл. 2.4, рис. 2.16) призначений для вимірювання параметрів шорсткості полірованих та доведених поверхней надточних деталей після механічної обробки, застосований у машинобудівної промисловості. Інтерференційну картину можна спостерігати у білому, а також і у монохроматичному світлі, фотографувати камерою, що входить до складу приладу.

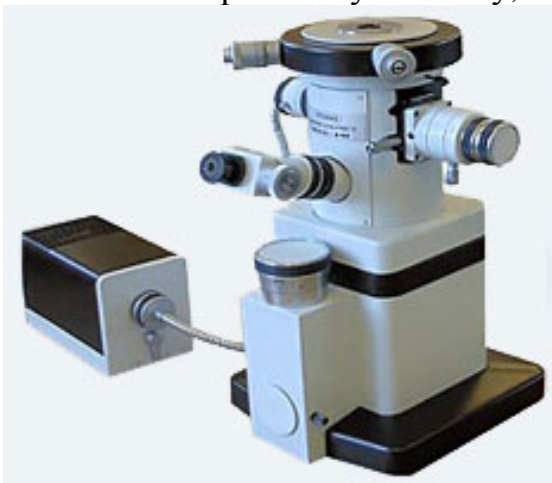


Рис. 2.16,а. Загальний вигляд мікроінтерферометра МИИ-4

На рис. 2.16,б показана оптична схема мікроінтерферометра МІІІ-4, що є основною моделлю двопроменевих мікроінтерферометрів. Мікроінтерферометр дозволяє проводити вимірювання за допомогою гвинтового окулярного мікрометра МОВ або фотоелектричного окулярного мікрометра ФОМ з автоматизованою обробкою результатів вимірювань. Застосування мікроінтерферометра з фотоелектричним окулярним мікрометром дозволяє підвищити точність вимірювань параметрів шорсткості в 2 рази, значно скоротити суб'єктивний чинник оператора. Тим самим підвищується якість поверхні надточних деталей.

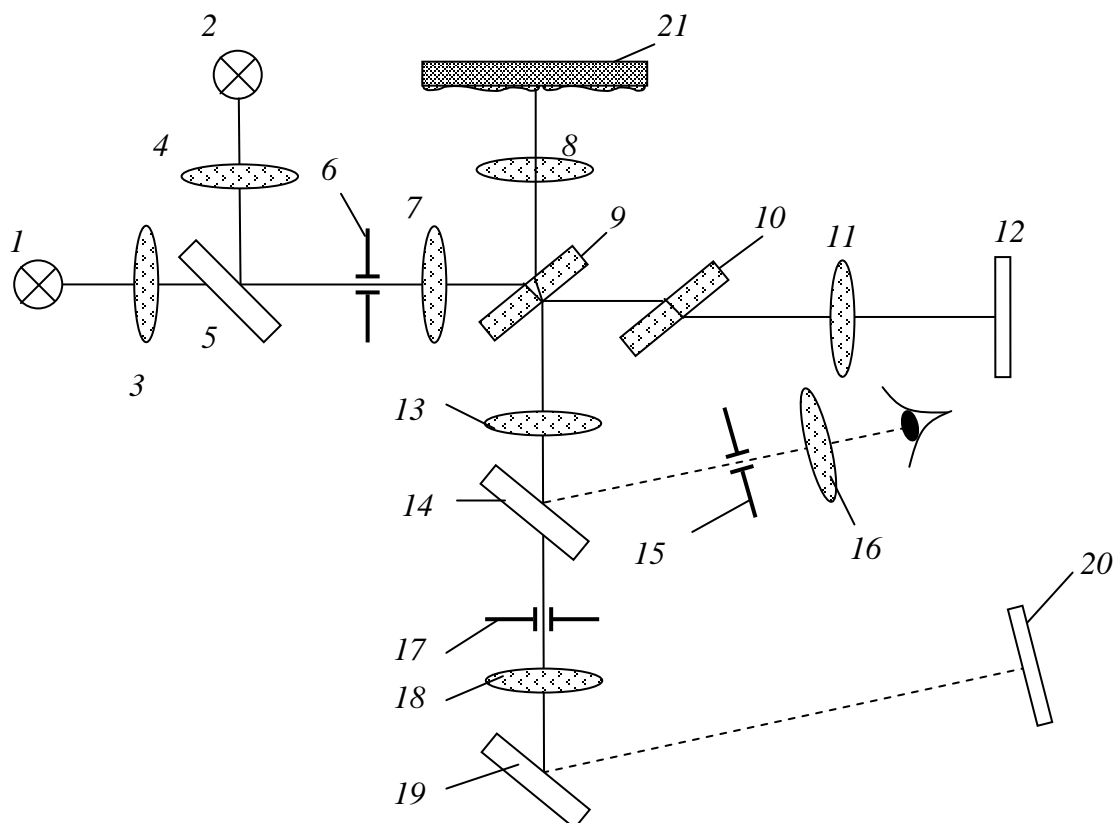


Рис. 2.16,б. Оптична схема мікроінтерферометра МІІІ-4: 1, 2 - лампи розжарювання, 3, 4 - конденсори, 5, 14 - напівпрозорі дзеркала, 6 – діафрагма ірисова, 7, 8, 11, 13 – об'єктиви, 9 – світлоділільна пластига, 10 – компенсатор, 12, 19 – дзеркала, 15, 17 – діафрагми, 16 – окуляр, 20 – фотоплівка, 21 – об'єкт контролю

Такі інтерферометри для вимірювання на металевих або інших поверхнях малої шорсткості є мікроінтерферометрами. Як і при контролі площинності, вимір висоти мікронерівностей здійснюють по скривленню смуг рівної товщини. Але оптичний прилад, призначений для спостереження дрібних нерівностей, повинен мати більше збільшення й високу розділювальну здатність. Тому

мікроінтерферометри являють собою сполучення інтерферометра типу Майкельсона (рідше Фізо) та мікроскопа.

Табл. 2.4. Характеристики мікроінтерферометра МІІІ-4

Параметр	Величина
Диапазон измерения параметров шероховатости Rmax и Rz и толщины пленок, мкм	0,1...0,8
Увеличение при визуальном наблюдении, крат	500
Линейное поле зрения в пространстве предмета, мм	0,3
Габаритные размеры микроинтерферометра, мм	300 x 300 x 420
Масса, кг	30

Форма інтерференційних смуг відтворює у великому масштабі профіль контрольованої ділянки поверхні. Ширину й напрямок смуг можна міняти, зміщуючи об'єктив *10* перпендикулярно оптичній осі й повертаючи його в зміщеному положенні навколо нерухомої оптичної осі системи. У наслідок настроювання інтерференційні смуги встановлюються перпендикулярно слідам обробки поверхні.

Мікроінтерферометри призначені для виміру висоти нерівностей на поверхнях, сліди обробки на які паралельні один одному. При хаотичному напрямку подряпин інтерференційна картина має складний вигляд, і вимірювання нерівностей стає неможливим.

Скривлення смуг оцінюють на око або вимірюють окулярним мікрометром. Висоту або глибину нерівності обчислюють по формулі

$$\delta h = 0.5\lambda\delta b/b,$$

де  $\lambda$  — середня довжина хвилі використовуваної ділянки спектра;

$\delta b$  — скривлення смуги;

$b$  — ширина смуги.

Якщо нерівність має профіль сходи, то інтерференційні смуги мають розрив. Для виміру висоти такої нерівності з оптичної схеми виводять світлофільтр і спостерігають смуги в білому світлі. Ахроматична смуга, що виділяється з кольорових, допомагає визначити форму смуги в зоні розриву.

Для того, щоб похибка виміру скривлення  $\delta b$  була не більше 0,1 смуги, видима в мікроскоп ширина смуг повинна становити не менш 3 мм. Смуги шириною 3 мм видні в мікроскоп зі збільшенням  $500\times$  у тому випадку, якщо ширина смуг  $b_0$  на контрольованій поверхні дорівнює 0,006 мм.

Такі смуги виходять при зсуві мікрооб'єктива *10* на величину

$$a/2 = \lambda f'/2b_0.$$

де  $f'$  - фокусна відстань мікрооб'єктива, рівне 6,2 мм; при  $\lambda = 5,5 \cdot 10^{-4}$  мм зсув  $a/2 = 0,28$  мм.

Відповідний зсув вихідної зіниці еталонної галузі  $a = 0,56$  мм.

Такий же зсув вихідної зіниці, тобто смуги такої ж ширини, можна одержати поворотом дзеркала *11* на кут  $\alpha = \alpha/2 f' = 4,5 \cdot 10^{-2}$  рад (приблизно  $2,5^\circ$ ).

Промислово випускається мікроінтерферометр МІІ-10, що є різновидом МІІ-4 зі спеціально зниженою чутливістю. Він призначений для виміру шорсткості порівняно грубих поверхонь із параметрами шорсткості  $2,5\text{—}0,04$  мкм. У МІІ-10 контролюють не саму поверхню, а її відбиток (репліку) на прозорій плівці, розміщеної в спеціальній камері з іммерсійною рідиною, що дозволяє випробовувати внутрішні поверхні, а також поверхні важко доступних ділянок виробу. Іммерсійно-репліковим методом контролюють поверхні з  $Ra = 2,5\text{--}0,08$  мкм. При контролі поверхонь із  $Ra = 0,16\text{--}0,04$  мкм МІІ-10 використовують як звичайний мікроінтерферометр.

Головним параметром мікроінтерферометрів є чутливість приладу, що повинна бути не менш  $0,05$  смуги. Як чутливість приладу прийнятий вигин інтерференційної смуги на шаблі, яка напилена на скляній плоскій пластині, виражений у частках смуги, котра може бути видимою в поле зору приладу й обмірюваною за допомогою відлікового пристрою.

Проте і такі високі характеристики, як показала практика вимірів, виявляються недостатніми для надійного виміру малої шорсткості *c*.  $R_z = 0,1 - 0,025$  мкм.

На підставі досліджень впливу апертури мікрооб'єктивів на систематичні похибки розроблений новий прилад. У ньому об'єктиви-ахромати ОХ-6 ( $A = 0,65$ ;  $f' = 6,2$  мм) замінені об'єктивами-апохроматами ОС-4 ( $A = 0,95$ ;  $f' = 4,3$  мм), а загальне збільшення підвищене з  $500\times$  до  $1860\times$ . У такому приладі поле зору зменшилося до  $0,11$  мм, що незначно менше необхідного за ДСТ 2789-73.

Метрологічна атестація підтвердила підвищені точнісні характеристики цього приладу.

#### § 2.4.5. Багатопроменеві мікроінтерферометри

Прилади, засади дії яких засновані на вимірі зсуву або форми інтерференційних смуг, утворених у повітряному клині між двома дзеркальними поверхнями малого розміру, частково проникне світло, є багатопроменевими мікроінтерферометрами. Вони призначені для вимірів товщини тонких плівок, малої неплоскості поверхонь і малих лінійних переміщень. У багатопроменевих мікроінтерферометрах використовується відбите світло, оскільки найпоширенішими є непрозорі об'єкти виміру.

Принципова схема МІІ-11 (рис. 2.17) заснована на класичній схемі Фізо. Світлове тіло монохроматичного джерела світла / (натрієвої лампи ДНаС-18 або ртутної лампи ДРС-50) проектується конденсором 2 на діафрагму 3, встановлену у фокальній площині об'єктива коліматора 5. Дзеркала 4, 8 і призма 6 забезпечують компактність освітлювача.

Паралельний пучок променів після відбиття від світлоділительного шару

призми-куба 11 спрямовується на досліджувану поверхню 9, у контакті з якої перебуває змінна інтерференційна пластинка 10. На нижній стороні пластинки 10 нанесене багаточислове світлоділільне покриття.

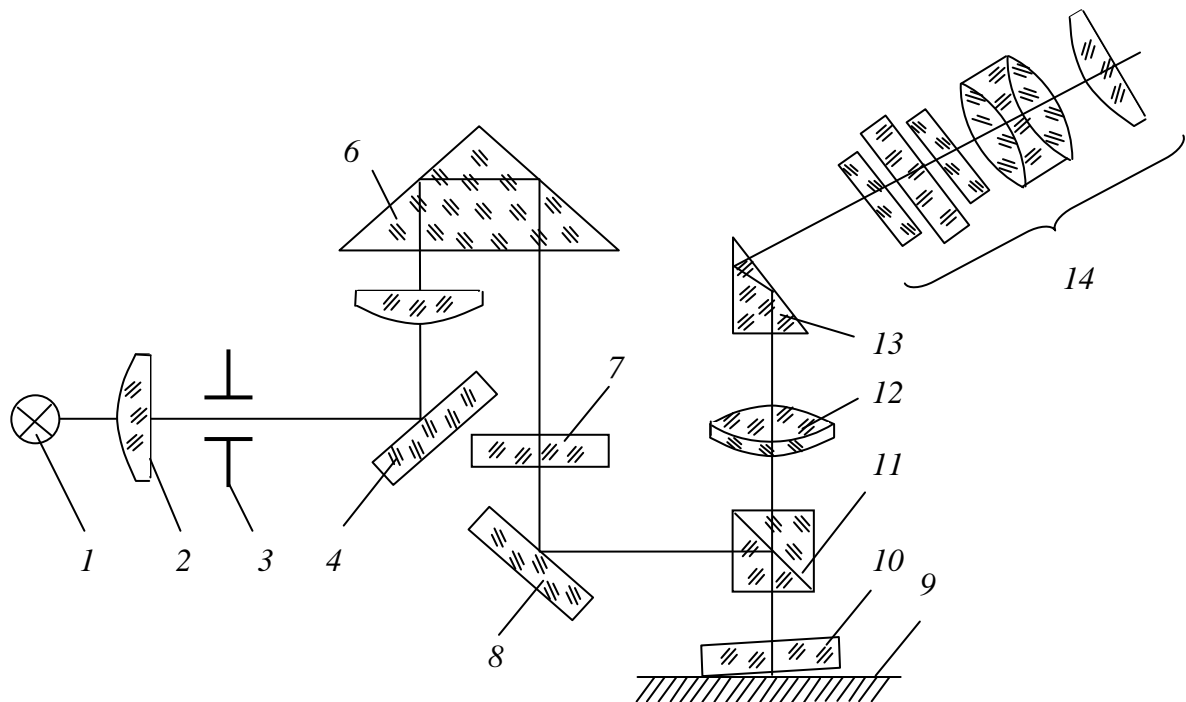


Рис. 2.17. Оптична схема багатопроменевого мікроінтерферометра МІІ-11

Багатопроменева картина смуг рівної товщини локалізується на контрольованій поверхні 9 і розглядається в мікроскоп малого збільшення, що складає з об'єктива 12, призми 13 і гвинтового окулярного мікрометра 14.

При роботі з лампою ДРС-50 у хід променів уводиться інтерференційний світлофільтр 7.

У результаті багатопроменевої інтерференції у відбитому світлі в поле зору видні вузькі чорні смуги на ясно-жовтому або ясно-зеленому тлі. При такій картині око оператора може помітити скривлення або зсув смуг, рівне 0,02 відстані між смугами, що відповідає зміні досліджуваної величини на 0,005 мкм. Це значення приймають за чутливість багатопроменевого мікроінтерферометра.

Відхилення досліджуваної поверхні від ідеальної площини або уступ на поверхні  $\Delta h$  обчислюють по формулі

$$\Delta h = 0.5\lambda\delta N$$

де  $\delta N$  — вигин (злам) інтерференційних смуг у частках відстані між ними.

Нехай паралельний пучок променів падає на повітряний клин, утворений двома плоскими напівпрозорими поверхнями  $P_1$  і  $P_2$  (рис. 3.29). Товщина відстані між  $P_1$  і  $P_2$ , що відповідає крапці  $O$ , дорівнює  $h$ , кут клина малий.

На рис. 2.18 для простоти показані тільки три промені, що приходять у крапку  $O$ . Очевидно, кут між променем, що відбився  $N$  раз від похилої грані, і променем, що пройшов пластину без відбиттів ( $N = 0$ ), дорівнює  $2NO$ .

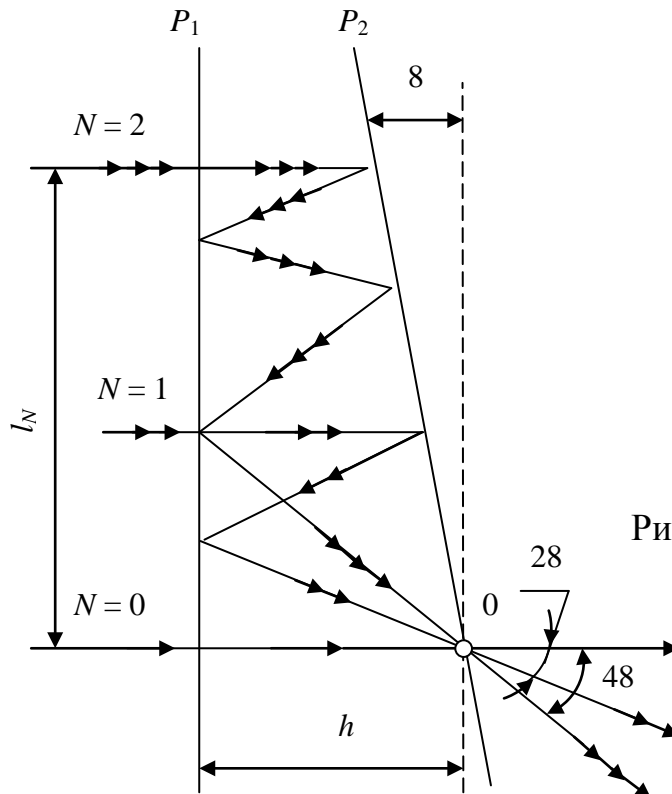


Рис. 2.18. Багатопроменева інтерференція в клині

У МІІ-11 застосовують мікроскоп зі збільшенням  $60^{\times}$  (при збільшенні окуляра  $15^{\times}$ ), лінійним полем зору 2,8 мм й апертурою об'єктива 0,1. Комплект приладу містить чотири набори змінних пластин з коефіцієнтами відбиття покриттів 0,45; 0,65; 0,75; 0,9. З їхньою допомогою можна контролювати поверхні з коефіцієнтом відбиття 0,3-1.

Основним недоліком багатопроменевих мікроінтерферометрів Фізо є мала апертура об'єктива мікроскопа. Об'єктив великої апертури не можна застосовувати в цій схемі тому, що він має малий робочий відрізок, й у його межах не міститься еталонна пластинка. Мала ж апертура об'єктива дає низьку роздільовальну здатність, тому МІІ-11 не використовують для точних вимірів мікронерівностей, крок яких менше межі розділення.



## § 2.5. Оптичний вимірювач довжини

Оптичні вимірювачі довжини призначені для абсолютних і відносних вимірювань розмірів виробів. Вимірювачі довжини випускаються трьох типів: ДВО — вертикальні окулярні, ДВЕ— вертикальні з проекційним екраном і ДГЕ — горизонтальні з екраном. Принцип дії вимірювачів довжини полягає у вимірюванні переміщення зразкової лінійної шкали, встановленої на одній осі з вимірювальним стрижнем.

### § 2.5.1. Вертикальні довжиноміри

У вертикального окулярного вимірювача довжини ИЗВ-1 (тип ДВО) (рис.2.19,*а*) міліметрова скляна шкала 3 встановлена в крізному отворі штока 2 з вимірювальним наконечником 1.

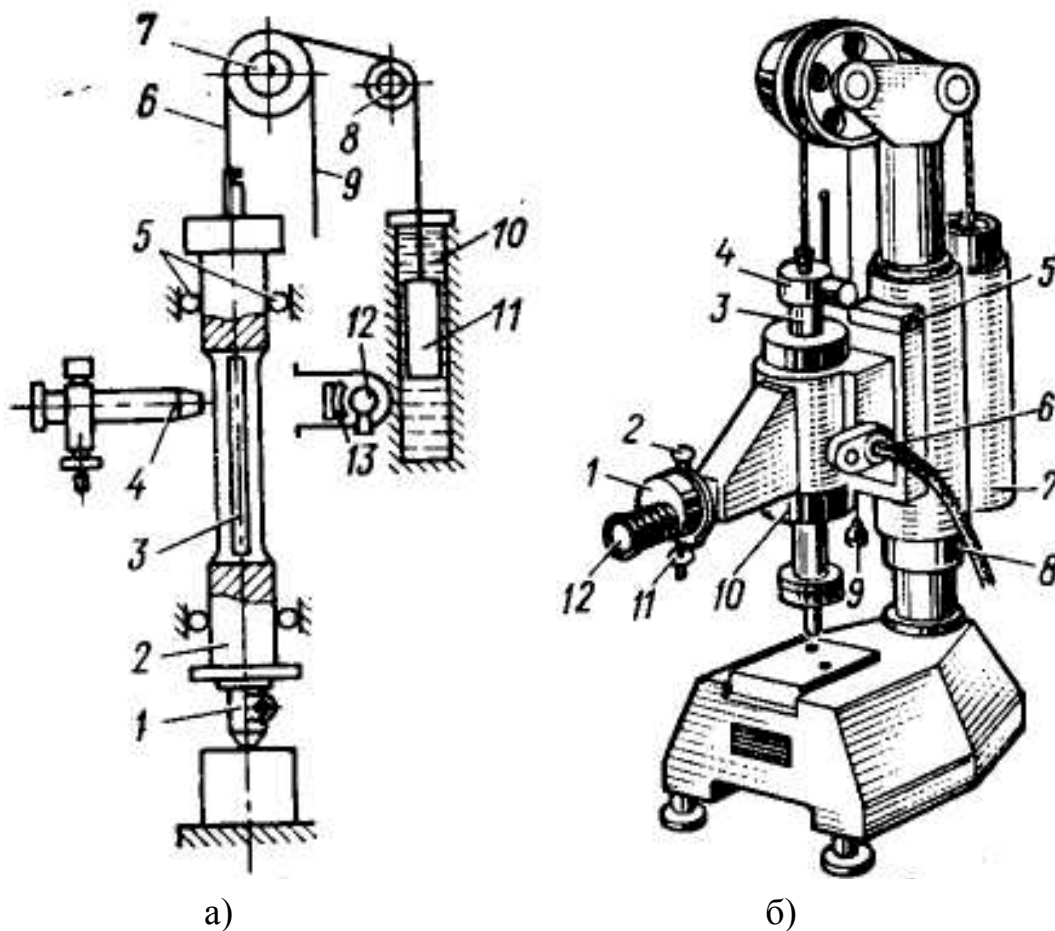


Рис. 2.19. Вертикальний довжиномір ИЗВ-1: *а* — схема; *б* — зовнішній вигляд

Шток переміщається в корпусі приладу в тих, що кулькових направляють 5. Він підвішений на гнучкій сталевій стрічці, перекинутій через блоки 7 і 8 і

прикріпленою на іншому кінці до протипаги 11, який переміщається в циліндрі 10, заповненому вазеліновим маслом. Це забезпечує плавне опускання штока, що виключає можливість ударів і пошкодження наконечника 1. Шток піднімають за трос 9. Шкала 3 освітлює лампочкою 12 через конденсор 13. Переміщення шкали щодо виробу, що перевіряється, вимірюють за допомогою спірального відлікового мікроскопа 4 з ціною ділення 0,001 мм. Довжина шкали рівна 100 мм, що відповідає верхній межі абсолютних вимірювань. Вимірювачі довжини ИЗВ-1 (рис. 2.19,б) складається з корпусу 7 і стійки С-П з наочним столом, що має ребристу поверхню. Стька дозволяє вимірювати розміри в межах 100...250 мм методом порівняння з мірою. Корпус переміщається по колонці гайкою 8 і кріпиться гвинтами 5. На корпусі встановлені освітлювач 6 і мікроскоп 1 з окуляром 12. Шток 3 піднімають за кнопку 9 і фіксують в будь-якому положенні гайкою 10. Вимірювальне зусилля на штоку регулюється знімними вантажними шайбами 4.

### § 2.5.2. Горизонтальні довжиноміри

**Спиральний мікроскоп** (рис. 2.20,а) складається з об'єктиву 5, який фокусує зображення основної шкали вимірювача довжини в площину між поворотною 3 і нерухомою 2 шкалами, і окуляра 1

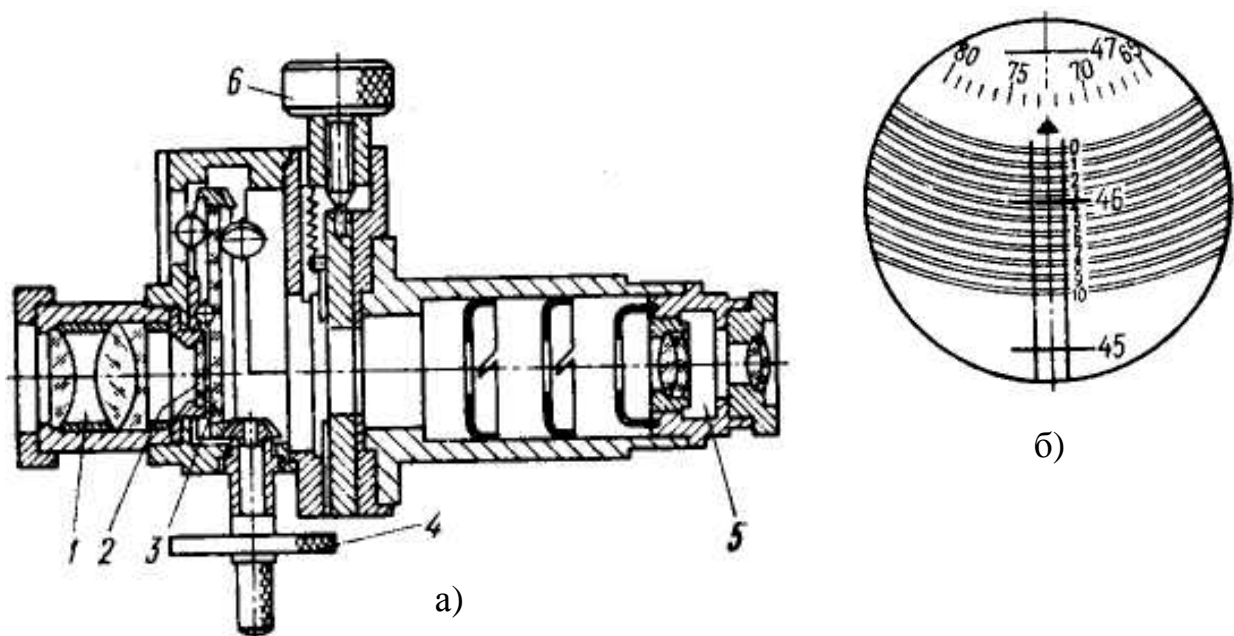


Рис. 2.20. Спиральний окулярний мікроскоп: а) пристрій; б) шкала

Збільшення об'єктиву складає  $5^{\times}$ , а збільшення окуляра— $12,8^{\times}$ . Ручка 4 служить для обертання поворотної шкали 3. Гвинтом 6 окуляр разом з ноніусом переміщається щодо об'єктиву. На поворотну шкалу 2 нанесена подвійна спіраль Архімеда з відстанню між нитками 0,012 мм і кроком спіралі 0,1 мм, а

також кругова шкала, що має 100 ділень (рис. 2.20,б). За один оборот поворотної пластини будь-яка точка спіралі зміщується для спостерігача на 0,1 мм по радіусу в напрямі від центру, а кругова шкала повертається на ділення від 0-го до 100-го. На нерухому шкалу нанесено два паралельні штрихи, рівномірна шкала з діапазоном показань 1 мм і ціною ділення 0,1 мм і покажчик. У окуляр видно довгі штрихи основної міліметрової шкали і спіральний ноніус. Для відліку ручку 4 обертають до тих пір, поки довгий штрих міліметрової шкали не опиниться між нитками спіралі. Цифра біля цього штриха показує число міліметрів в розмірі (46 мм). Десяті долі міліметра відлічують за лінійною окулярною шкалою щодо довгого штриха (0,3 мм). Соті й тисячні долі міліметра показує на круговій шкалі нерухомий покажчик (0,072 мм). Відлік за шкалою мікроскопа рівний 46,372 мм. Перед вимірюванням вимірювач довжини (див. рис. 2.19,б) встановлюють на нуль. При звільненому стопорі 10 шток приладу опускається до зіткнення з поверхнею вимірювального столу або з поверхнею кінцевої міри завдовжки 100 або 150 мм, притертой до столу. Обертаючи ручку 11 відлікового мікроскопа, кругову шкалу переводять в положення 00 щодо покажчика (рис. 2.20,б). При цьому всі штрихи окулярної шкали (короткі штрихи) розташуються між нитками подвійної спіралі. При правильній установці нульовий штрих або штрих 100 мм (при настройці по кінцевій мірі) також повинні лежати між нитками спіралі. Якщо останні умови не виконані, то гвинтом 2 (див. рис. 2.19,б) зміщують окуляр мікроскопа в потрібне положення. При вимірюваннях за кнопку 9 піднімають шток і встановлюють виріб на стіл, потім шток під дією сили тяжіння опускається на поверхню виробу, після цього здійснюють відлік показань.

**Горизонтальний вимірювач довжини ИКУ-2** (тип ДГЕ) заснований на поєднанні засад дії вертикальних вимірювачів довжини і оптиметра. Світло від лампи 1 (рис. 2.21,а) через освітлювальну систему 2 спрямовується дзеркалами 9 і 4 і призмою 5 на лінзу 6 і освітлює скляну міліметрову шкалу 3. Зображення шкали проектується об'єктивом 8 через призму 10 в площину нерухомої бисекторної шкали 11 з ціною ділення 0,1 мм.

Шкала 11 разом з штрихом основної шкали через призму 12 проектується об'єктивом 13 через дзеркала 14 і 25 на екран 7. Освітлювальна система 26 через призму 18 освітлює сітку 19, яка має шкалу з ціною ділення 0,001 мм на одній половині. Оптична система, що складається з призм 20, 21, 23 і об'єктиву 22, який розташований у фокальній площині сітки 19, і дзеркала 24, пов'язаного з вимірювальним стрижнем приладу, створює зображення автоколімації шкали на іншій половині окулярної сітки 19, на яку нанесений відліковий індекс. Зображення шкали і індекс проектується об'єктивом 17, дзеркалами 16 і 25 на екран 7. За допомогою допоміжної лінзи 15 регулюється правильна установка лампи 1.

Горизонтальний вимірювач довжини (рис. 2.21,б) має станину 1, вимірювальну 10 та пінольну бабку 2 і робочий предметний стіл 7.



Вимірювальна піноль 8, в якій розташовані основна шкала, вимірювальний стрижень і дзеркало оптиметра, грубо переміщається маховиком 11, тонко — мікрогвинтом 12 і стопориться гвинтом 13. Пінольну бабку переміщують маховиком 4 і стопорять гвинтом 3. Тонку подачу наконечника 6 пінолі здійснюють мікрогвинтом 5. Робочий стіл 7 у вертикальному напрямі переміщається маховиком 17, в поперечному напрямі — гвинтом 14. Верхня частина столу вільно переміщається на кульках в подовжньому напрямі. Стіл повертають навколо вертикальної осі маховиком 15, а навколо поперечної горизонтальної осі — маховиком 16.

Табл. 2.5. Основні характеристики довжиномірів

Параметри	Тип приладу	
	ИЗВ-2	ИКУ-2
Межі безпосередніх вимірювань, мм	від 0 до 100	від 0 до 100
Межі вимірювання довжин, мм		
- зовнішніх	від 0 до 250	від 0 до 500
- внутрішніх	-	від 13,5 до 150
Ціна поділки відлікового пристрою, мм	0,001	0,001
Похибка приладу, при вимірюванні зовнішніх розмірів, мм		
-без урахування поправок за атестатом шкали	$\pm[0,0014 + L/(1,4 \cdot 10^5)]$	
-при введенні поправок за атестатом шкали	$\pm[0,0015 + L/(2 \cdot 10^5)]$	
Габаритні розміри приладу, мм	260x450x600	1150x460x520
Маса приладу, кг	36	150

При абсолютних вимірюваннях прилад встановлюють на нуль, звівши вимірювальні наконечники до зіткнення і регулюючи їх співісну так само, як на горизонтальному оптиметрі. Гвинтом 12 встановлюють на нуль верхню шкалу екрану 9, а потім гвинтом 5 — нижню шкалу екрану. При вимірюванні вимірювальні піноль відводять, на столі закріплюють виріб, і потім переміщують вимірювальні піноль доти, доки показання на нижній шкалі екрану 9 не стануть близькими до нуля. Мікрогвинтом 12 суміщують штрих основної шкали з найближчим биссектором — подвійним штрихом відлікової шкали з ціною ділення 0,1 мм. Потім робочий стіл переміщують залежно від вигляду виробу так само, як при вимірюваннях на оптиметрі. За верхньою шкалою екрану відлічують цілі і десяті долі міліметра, а за нижньою шкалою — соті і тисячні. Відлік на екрані вимірювача довжини складає 4,572 мм (див. рис.2.21,а). Відносні вимірювання виконують так само, як на оптиметрі. Показання вимірювача довжини (верхня шкала) не враховують.

За допомогою горизонтального довжиноміра можна вимірювати як зовнішні, так і внутрішні лінійні розміри безпосередньо по шкалі приладу або шляхом порівняння з іншими мірами.

### § 2.5.3. Оптико-механічні машини для вимірювання лінійних розмірів

Для вимірювання більш видовжених виробів використовуються вимірювальні машини. Особливості їх зводяться до наступного. Оптико-механічні машини ИЗМ мають ціну ділення 0,001 мм і межі вимірювань 0...1 м (ИЗМ-1), 0...2 м (ИЗМ-2) і 0...4 м (ИЗМ-4). Вони призначені для абсолютних і відносних вимірювань нутромірів, кінцевих мерів довжини, калібр-пробок, скоб, кілець та інших інструментів, а також точних виробів великих розмірів.

При вимірюваннях вертикальних відтінків на недоступних для безпосереднього вимірювання об'єктах користуються катетометрами. Засади дії цих приладів полягають в тому, що оптична вісь візирного пристрою, що виставлена за рівнем, наводиться на края вимірювального виробу. Розмір об'єкта вимірювання визначають за різницею відліків.

Табл. 2.6. Основні характеристики катетометра КМ-9

Параметр	Величина
Границя вимірювання по вертикалі, мм	від 0 до 100
Границя оберту колонки, <sup>0</sup>	від 0 до 360 <sup>0</sup>
Гранична похибка відліку по масштабній сітці мікроскопа, мм	±0,0018
Ціна поділки циліндричного рівня зорової труби без насадочних лінз,	17,1 <sup>x</sup>
Збільшення відлікового мікроскопа	40 <sup>x</sup>
Похибка вимірювання вертикальних відтінків, мм:	
- при відстані до об'єкта (470–760) мм	±0,025
- при відстані (610–1000) мм	±0,030
- при відстані (890–2000) мм	±0,035
Габаритні розміри, мм	560x640x1650
Маса, кг	150

Принцип дії вимірювальних машин полягає в наступному. Уздовж станини 1 (рис. 2.22,а, у вікнах ) розташовані зразкові оптичні шкали — метрова і міліметрова.

Метрова шкала являє собою від'ємні через 100 мм скляні пластини 6, на яких нанесені подвійні штрихи (бісектори) і цифри, що показують число дециметрів.

Міліметрова скляна шкала 10 має інтервал ділень 0,1 мм і діапазон показників 100 мм. Уздовж станини над метровою шкалою переміщується

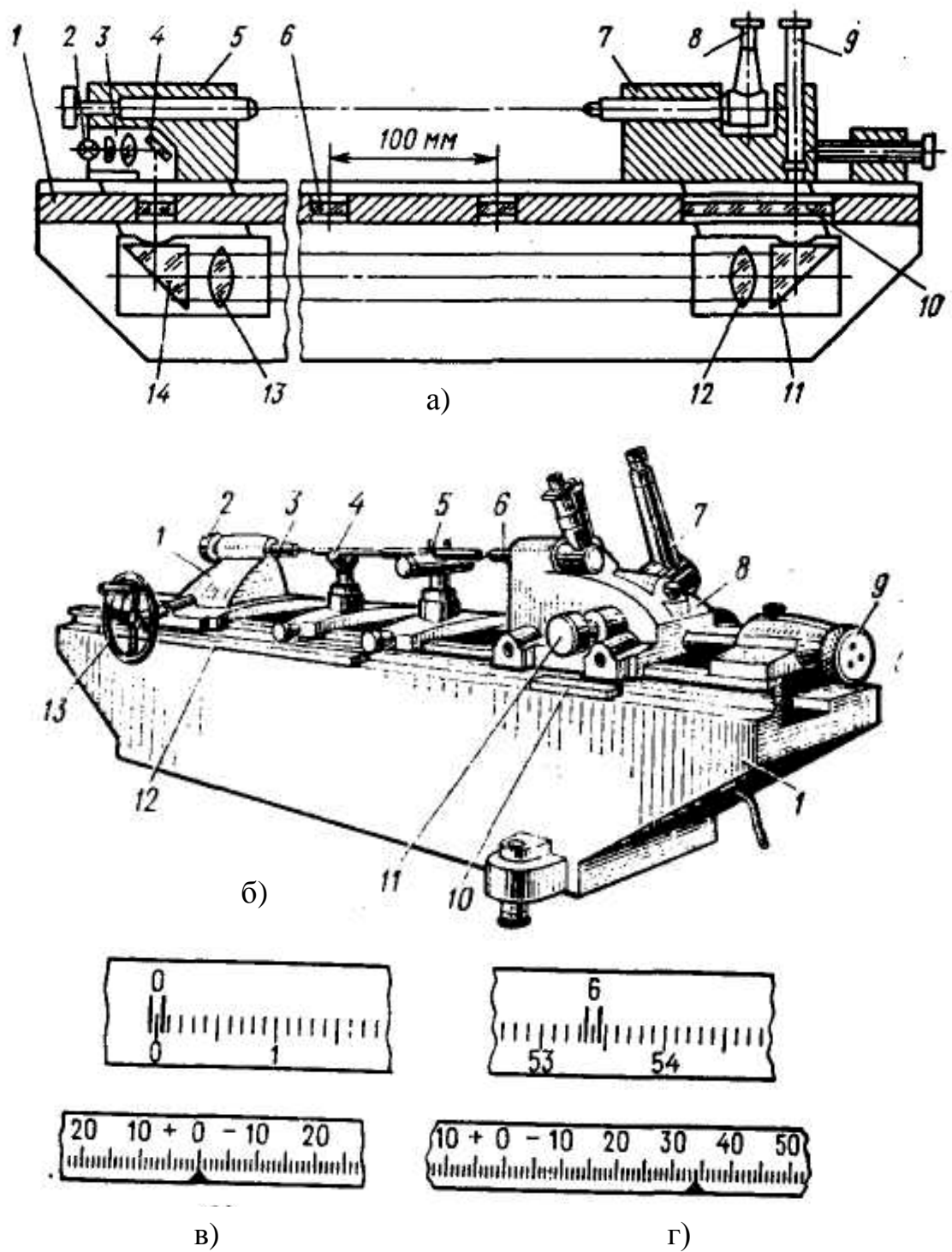


Рис. 2.22. Оптико-механічна машина ИЗМ; а — оптична схема; б — зовнішній вигляд; в, г — шкали відповідно при встановленні на нуль та при вимірюванні

пінольна бабка 5 з освітлювачем, над міліметровою шкалою — вимірювальна бабка 7. Світло від лампи 2 через конденсор 3 і дзеркало 4 освітлює одну з пластин 6, яка розташована у фокальній площині об'єктиву 13. Призми 11 і 14 відхиляють хід світлових променів на  $90^\circ$ . Об'єктив 13 направляє світловий потік із зображенням бісектора у вимірювальну бабку 7. Об'єктив 12 фокусує зображення на шкалу 10, яку спостерігають в мікроскоп 9. Для відліку сотих і тисячних долей міліметра є шкала трубки оптиметра з окуляром 8.

Перед абсолютними вимірюваннями машину (рис. 2.22,б) встановлюють на нуль. Пінольну бабку 1 переміщують маховиком 13 і закріплюють над крайньою правою пластиною, відповідною нулю дециметрів.

Вимірювальну бабку 8 спочатку грубим маховиком 9, а потім мікрогвинтом 1 переміщують так, щоб зображення бісектора доводилося на нульове ділення шкали (див. рис. 2.22,в). При цьому наконечники пінолі 3 і трубки оптиметра 6 стикаються. Вимірювальні стрижні встановлюють на одній осі (центрують) так само, як у оптиметрів. Потім, обертаючи мікрогвинт 2 пінольної трубки, встановлюють на нуль оптиметр.

При вимірюваннях пінольну бабку встановлюють, орієнтуючись на допоміжну металеву лінійку 12 з дециметровими діленнями на необхідний розмір. Вимірювальну бабку відсовують управо і встановлюють виріб на наочний стіл або на люнети 4 і 5, які використовують при вимірюваннях довгих циліндрових виробів діаметром до 50 мм. Потім вимірювальну бабку, користуючись для орієнтації металевою лінійкою 10, переміщують маховиком 9 до зіткнення наконцевиків пінолі та оптиметра з виробом. Показання оптиметра не повинне вийти за межі шкали. Якщо виріб закріплений на наочному столі, то поверхні виробу встановлюють перпендикулярно до лінії вимірювання шляхом переміщень столу, як у горизонтального оптиметра. Потім вимірювальну бабку, спостерігаючи в окуляр мікроскопа 7, переміщують мікрогвинтом 11 до поєднання бісектора з найближчим штрихом міліметрової шкали і проводять відлік цілих і десятих долей міліметра. Відлік десятих долей міліметра в розмірі здійснюють за штрихом міліметрової шкали, розташованому між бісектором.

За шкалою оптиметра відлічують соті і десяті долі міліметра. Позитивні показання оптиметра підсумовують з відліком мікроскопа, а негативні віднімають. Відлік по шкалах вимірювальної машини (рис. 2.22,г) складає  $653,4 - 0,034 = 653,366$  мм.

Якщо замість оптиметра у вимірювальну бабку встановити автоколімаційний мікроскоп — трубку Зельдіна, то можна безконтактним методом визначити радіуси кривини оптичних поверхонь. Відлік в цьому випадку проводиться по шкалі з ціною поділки 0,1 мм.

Відносні вимірювання розмірів на машинах проводять так само, як на горизонтальному оптиметрі. Оптичну систему машини при цьому не використовують.



Вимірювальні машини комплектують різноманітними пристосуваннями, які дозволяють вимірювати зовнішні і внутрішні розміри різних виробів, наприклад пристосування з дугами.

## § 2.6. Інструментальні та універсальні мікроскопи

Вимірювальні мікроскопи призначені для лінійних і кутових вимірювань різноманітних виробів в прямокутних і полярних координатах.

На мікроскопах вимірюють зовнішні лінійні розміри виробів, діаметри валів і отворів, кути різального інструмента і шаблонів, основні елементи профілю різбових інструментів і калібрів, радіуси закруглень профілей, розміри конусів, відстань між центрами отворів і тому подібні параметри деталі після механічної обробки.

В машинобудуванні найбільш поширений малий (ММІ) і великий (БМІ) інструментальні мікроскопи і універсальні мікроскопи УИМ-21, УИМ-23 і УИМ-24. Вони мають один принцип вимірювань і розрізняються за конструкцією, діапазоном вимірювань і за областю застосування.

Межі вимірювання кутів на мікроскопах УИМ-21, УИМ-23 та УИМ-24 0–360°; ціна поділки шкали визначення координат 0,001 мм; ціна найменшої поділки голівки 1' вимірювання кутів.

Оптична схема мікроскопа наведена на рис. 2.23. Освітлювач, що складається з лампи 16, змінного конденсора 15, зеленого світлофільтру 14 і ірисової діафрагми 13, освітлює через дзеркало 12 і об'єктив 11 виріб 9, що встановлений на предметному склі 10. Змінний об'єктив 8 візирного мікроскопа *М* проектує тіньовий контур виробу у фокальну площину окуляра 1 кутомірної головки, в якій розташована поворотна сітка 2. Скло 6 оберігають об'єктив від грязі і пошкоджень при заміні окулярної головки *ОГ*. Обертаюча призма 7 дозволяє спостерігати в окуляр пряме зображення контура виробу. Кут повороту окулярної сітки 2 вимірюють по жорстко закріпленою на сітці 2 кутовій круговій шкалі — лімбу 4 з ціною ділення 1°. Лімб спостерігають в окуляр 3 мікроскопа із значенням відліку  $\Gamma$ . Дзеркало 5 підсвічує лімб від зовнішнього джерела світла або освітлювального пристосування.

На поворотну окулярну сітку 1 кутомірної головки (рис. 2.24) нанесено дві суцільні лінії під кутом 60° одна до іншої, штрихове перехрестя і чотири паралельні лінії, віддалені від центру на відстані 0,3 і 0,9 мм. На їх фоні видно тіньовий контур виробу. Окуляр мікроскопа має градусну шкалу 2 і хвилинну шкалу 3. Відлік на рис. 2.24 складає 30°25'.

При вимірюваннях тіньовий контур граней виробу, що обмежують розмір, що перевіряється /, суміщають з штрихами окулярної головки шляхом переміщень столу з наочним склом і повороту окулярної сітки. Значення переміщень визначають по відлікових пристроях.

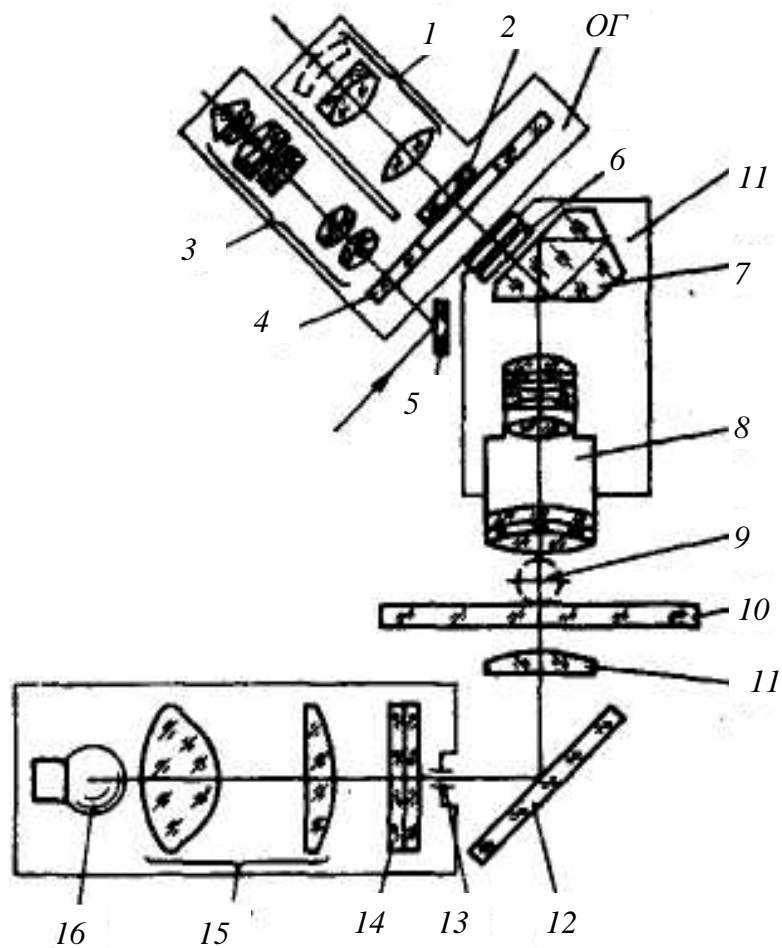


Рис. 2.23. Оптична схема мікроскопа

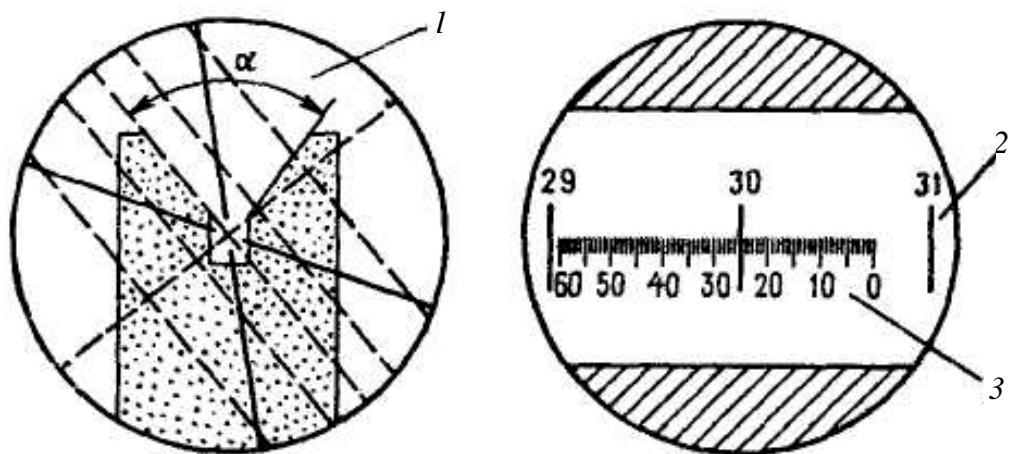


Рис. 2.24. Приклад вимірювання параметру за допомогою мікроскопа

**Малий і великий інструментальні мікроскопи** (рис. 2.25) мають масивну підставу *1*, у середині якого змонтовані вузли оптичної системи, а на задній стороні розташований освітлювач *16*. Освітлювач має накатне кільце для регулювання діафрагми, правильний вибір якої підвищує точність вимірювань. На підставі встановлені полозки *3* з робочим столиком *4*, таким, що має крізний отвір, закритий склом.

Мікрометричні головки *2* і *18* з ціною поділення 5 мкм і межами вимірювань 0...25 мм переміщують полозки в подовжньому і поперечному напрямках.

Для розширення діапазону вимірювань між торцями мікрогвинтів і опорними площинками полозків встановлюють кінцеві міри довжини. Полозки притискаються до мікрогвинтів пружинами. Поворот столу навколо вертикальної осі здійснюють маховиком *19*. У ММІ кут повороту столу складає  $\pm 5^\circ$ .

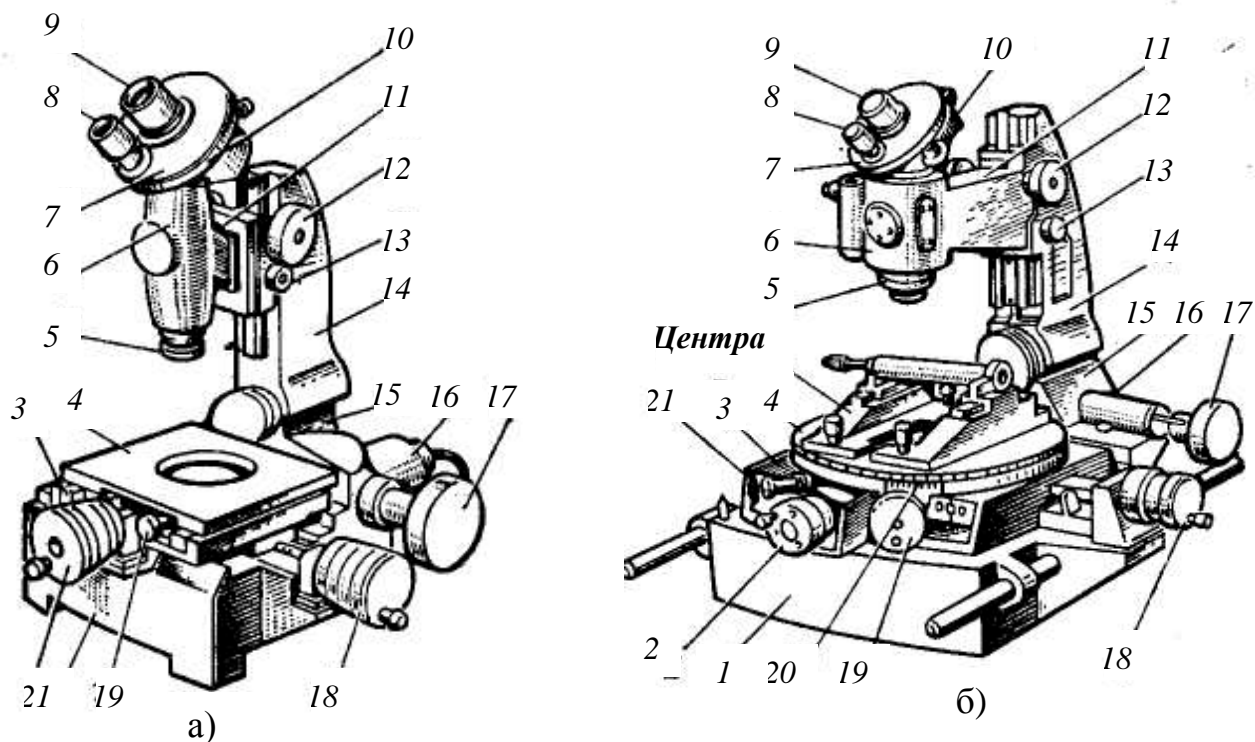


Рис. 2.25. Інструментальні мікроскопи: *а* — ММІ; *б* — БМІ

Кути повороту столу БМІ в межах від 0 до 3600 відлічують за лімбом *20* з ноніусом. Гвинт *21* затискає стіл в потрібному положенні. При вимірюваннях стіл повертають так, щоб лінія його переміщень співпадала з лінією вимірювань. На підставі встановлена опора *15* з колонкою *14*. Колонка повертається на кут у межах  $\pm 12^\circ 30'$  від вертикалі маховиком *17*, який має

кутомірну шкалу з ціною ділення 30'. Кронштейн 11 з тубусом 6 візирного мікроскопа переміщається на колонці маховиком 12 і затискається гвинтом 13. На тубусі закріплена кутомірна головка 7 з окуляром 9, в який спостерігають виріб, встановлений на столі. Окулярну сітку наводять на контур виробу поворотом кільця 10. Кут повороту окулярної сітки спостерігають в окуляр 8 мікроскопа. Різкість зображення тіньового контура регулюють поворотом кільця 5.

Межі вимірювань ММІ складають від 0 до 75 мм в подовжньому і від 0 до 25 мм в поперечному напрямках, а межі вимірювань БМІ відповідно від 0 до 150 мм та від 0 до 50 мм.

На інструментальних мікроскопах вимірювання здійснюються за допомогою комплекту приладдя, в який входять змінні об'єктиви із збільшенням від 1 до 5 крат, призматичні стійки, центрові бабки, V-подібні підставки, призми, притиски і струбцини для кріплення виробів на столі, кінцеві заходи завдовжки 25, 50, 75 і 100 мм, контрольний валик для виставляння осі виробу уздовж лінії вимірювання, освітлювальний пристрій для вимірювань у відбитому світлі. Можуть поставлятися також револьверна головка з дугами різної кривизни і набором профілів різьби, пристосування для фотографування, проекційна насадка з екраном, комплект вимірювальних ножів з пристосуванням для їх кріплення тощо (рис. 2.26).

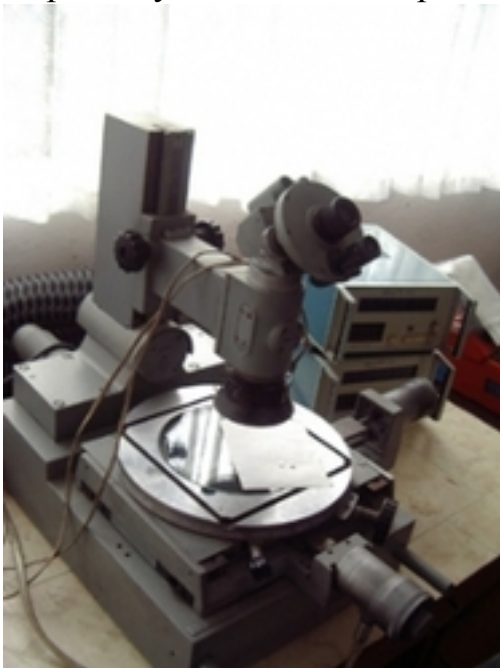


Рис. 2.26. Інструментальні мікроскопи типу ИМЦ 150х506

### **Мікроскоп металографічний МИМ-10**

Мікроскоп металографічний дослідницький МИМ-10 (табл. 2.7) призначений для візуального спостереження й фотографування мікроструктури металів при збільшенні від 20 до 2000 крат, а також для кількісного аналізу фазового й структурного об'ємного состава стопів за допомогою напівавтоматичного інтеграційного пристрою.

Дослідження на мікроскопі можуть проводитися у світлому полі при прямому й косому висвітленні, у темному полі, у поляризованому світлі, методом фазового контрасту й інтерференції.

Комплект оптики мікроскопа забезпечує стандартні збільшення при візуальному спостереженні, фотографуванні на фотопластинки й розгляданні зображення на екрані. На мікроскопі можна фотографувати об'єкти на фотоплівку. При фотографуванні на фотопластинки використовується експонетричний пристрій.

Мікроскоп може застосовуватися в металографічних лабораторіях науково-дослідних інститутів і заводів. У приміщенні, де встановлюється мікроскоп, не повинне бути парів кислот і лугів, а також верстатів або іншого обладнання, що викликає вібрації.

Табл. 2.7. Технічні характеристики мікроскопа металографічного МИМ-10

Параметр	Величина
Збільшення мікроскопа, крат:	
- при візуальному спостереженні	від 20 до 2000
- при фотографуванні:	
• на пластинку	від 50 до 2000
• на плівку	від 15 до 608
Фокусна відстань тубусної лінзи, мм	250
Діапазон переміщення столика, мм	
• у поздовжньому напрямку	від 0 до 15
• у поперечному напрямку	від 20 до 35
Діапазон обертання столика, град	від 0 до 360
Максимальне навантаження, кГ	1,0
Діапазон переміщення механізму мікрометричного фокусування, мм	від 0 до 2
Ціна поділу шкал мікроскопа, мм	
- предметного столика	1
- шкали з ноніусом	0,1
- лімба предметного столика, град	1
- механізму мікрометричного фокусування, мм	0,002
Режим роботи скануючого столика	- Автоматичний - крапковий - лінійний - гранулометричний - ручний
Діапазон переміщення скануючого столика, мм	від 5 до 55

Продовження табл. 2.7

Крок сканування, мкм	1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600, 800
Максимальне навантаження, кГ	1
Розміри фотопластинок, см	- 9x12 - 13x18
Розмір кадру фотоплівки, мм	24x36
Джерела світла (Живлення ламп здійснюється від пульта керування).	- лампа розжарювання з йодним циклом КГМ9-70 - ксенонова дугова лампа ДКСШ-120
Живлення	Мережа змінного струму напругою (220+22) В, частотою (50+0,5) Гц
Повна потужність, споживана мікроскопом, не більше	1000 ВА
Габаритні розміри, мм	1780x780x125
Маса мікроскопа, кГ	300

**Універсальний мікроскоп УИМ-21** (рис. 2.27, табл. 2.8) має станину 1, подовжню 3 і поперечну 13 кареток.

Табл. 2.8. Основні характеристики універсальних мікроскопів

Параметр	Тип приладу		
	УИМ-21	УИМ-23	УИМ-24
Межа вимірювання довжин, мм:			
- в поздовжньому напрямку	від 0 до 200	від 0 до 200	від 0 до 500
- в поперечному напрямку	від 0 до 100	від 0 до 100	від 0 до 200
Габаритні розміри, мм	1145x1060x705	150x1150x1500	1500x1300x1600
Маса, кГ	414	540	1550

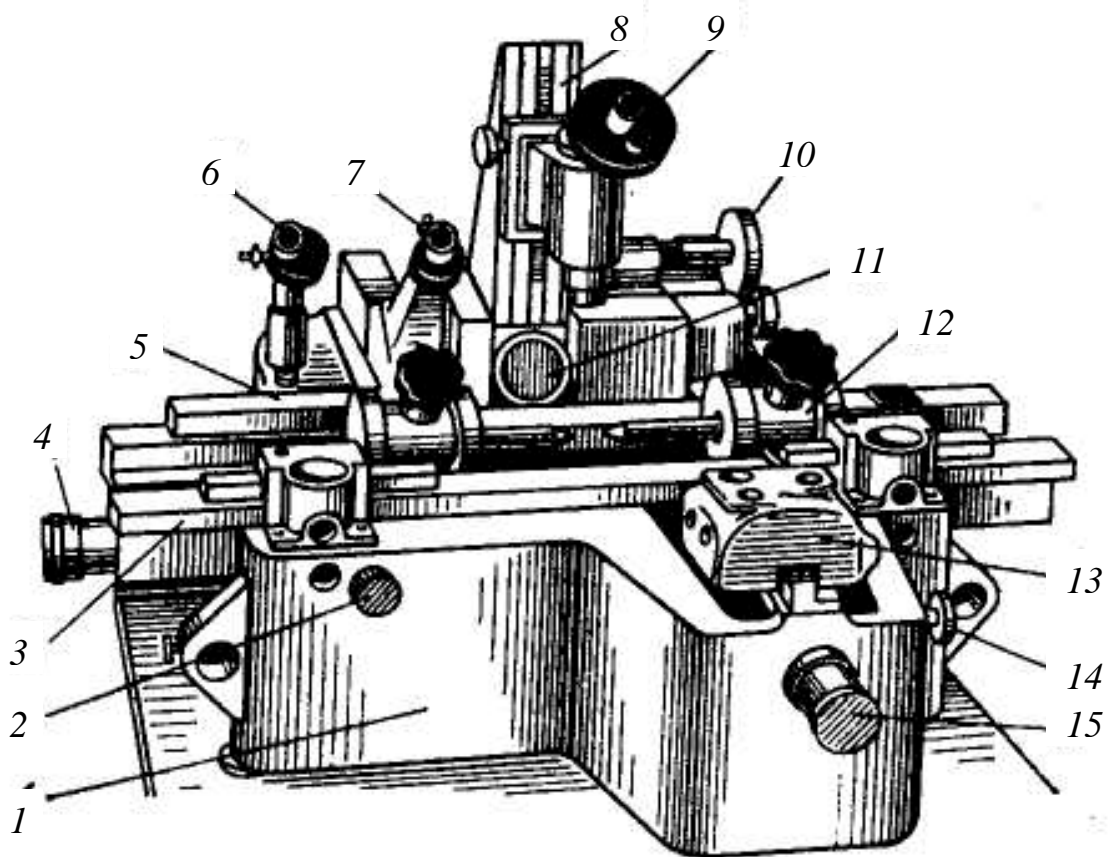


Рис. 2.27. Універсальний мікроскоп УИМ-21

На подовжній каретці закріплюються спеціальні робочі столи, центрові бабки 12 і інше приладдя для установки виробів. На поперечній каретці змонтовані освітлювальна система і колонка 8, на кронштейні якої закріплений головний мікроскоп 9 з кутомірною окулярною головкою. Маховик 10 служить для нахилу головки, маховик 11 — для регулювання діафрагми освітлювача. Каретки переміщуються мікрогвинтами 4 і 15. Переміщення вимірюють по скляних міліметрових шкалах 5, укріпленим на каретках, за допомогою нерухомих відлікових мікроскопів 6 та 7 з ціною ділення 1 мкм. Кожен мікроскоп забезпечений малим освітлювачем. Межі вимірювань складають від 0 до 200 мм в подовжньому і від 0 до 100 мм в поперечному напрямках. Каретки можна пересувати вручну при ослаблених стопорних гвинтах 2 і 14.

**Універсальний мікроскоп УИМ-23** (рис. 2.28,а) на відміну від розглянутих вище мікроскопів має відлікові пристрої проєкційного типу. Усередині підстави 1 розміщена більшість деталей оптичної системи, а зовні встановлені на тих, що точних направляють подовжня 3 і поперечна 2 каретки. Подовжня каретка має циліндрове ложе, в яке можуть бути встановлені центрові бабки 4, які слугують для закріплення циліндрових деталей. На

опорних площинах цієї каретки можуть бути закріплені пристосування, плоский і круглий стіл, планки для вимірювальних ножів тощо

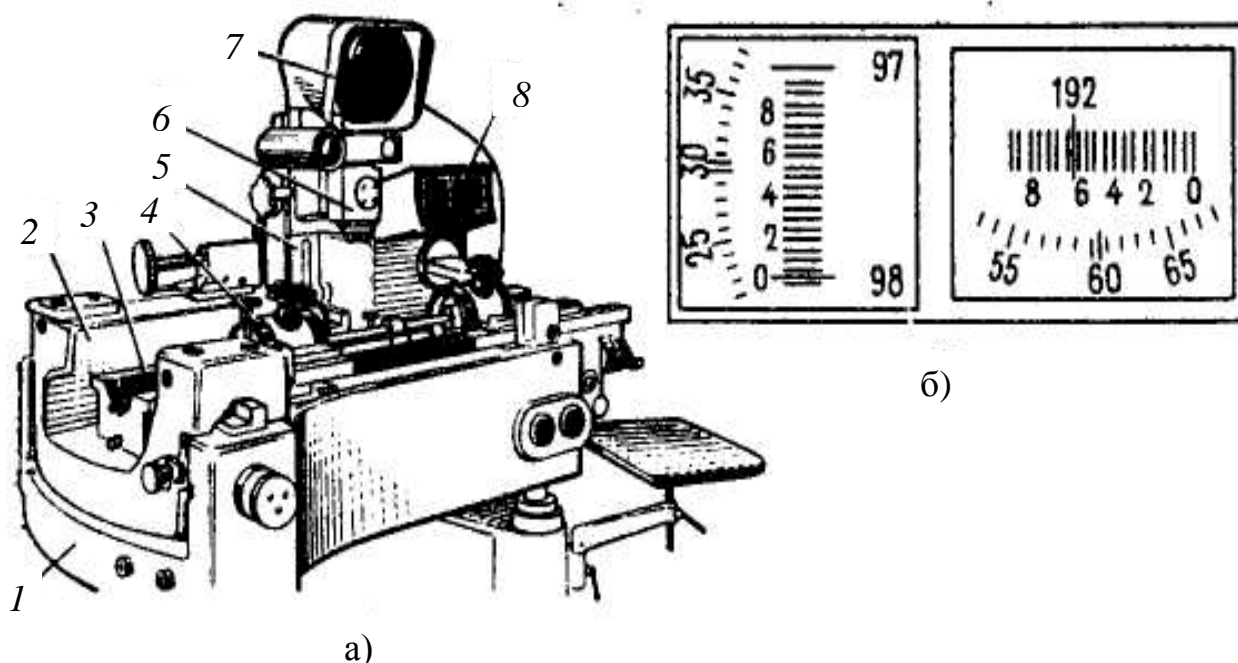


Рис. 2.28. Універсальний мікроскоп УИМ-23: *а* — зовнішній вигляд; *б* — шкали

На поперечній каретці розташовані колонка 5 та освітлювальний пристрій (у середині). Шкали візирного мікроскопа 6, який наводиться на вимірюваний виріб, проектується на екран 7. На кожній каретці жорстко закріплена скляна шкала, по якій вимірюють переміщення виробу в подовжньому або поперечному напрямках. Зображення штрихів скляних шкал разом з шкалами відлікових пристроїв проектується на екран 8. За міліметровим штрихом, розташованим між подвійним штрихом лінійної шкали, знаходять цілі і десяті долі міліметра, а по індексу на рухомій круговій шкалі — соті та тисячні долі. Відліки по шкалах мікроскопа складають для поперечної каретки 93,030 мм, для поздовжньої каретки 192,661 мм.

Універсальні мікроскопи відрізняються від інструментальних ширшим діапазоном і більшою точністю вимірювань. Універсальний вимірювальний мікроскоп УИМ-24 містить дві самостійні оптичні системи. Перша система включає проектор та візирний мікроскоп, що призначені для точного наведення на вимірюваний виріб.

Друга оптична система (рис. 2.29) містить відліково-проекційні системи поздовжнього та поперечного ходу кареток. Джерело світла 12 та система, що містить конденсор 11, призми 10 та 13, колектив 14, призму 15, призначені для освітлення міліметрової шкали 16 поперечного ходу. Зображення штрихів шкали проектується системою з об'єктиву 17 та призми 9 в площину штрихів колової шкали 7 та сітки із бісектором (на рис. не показано).



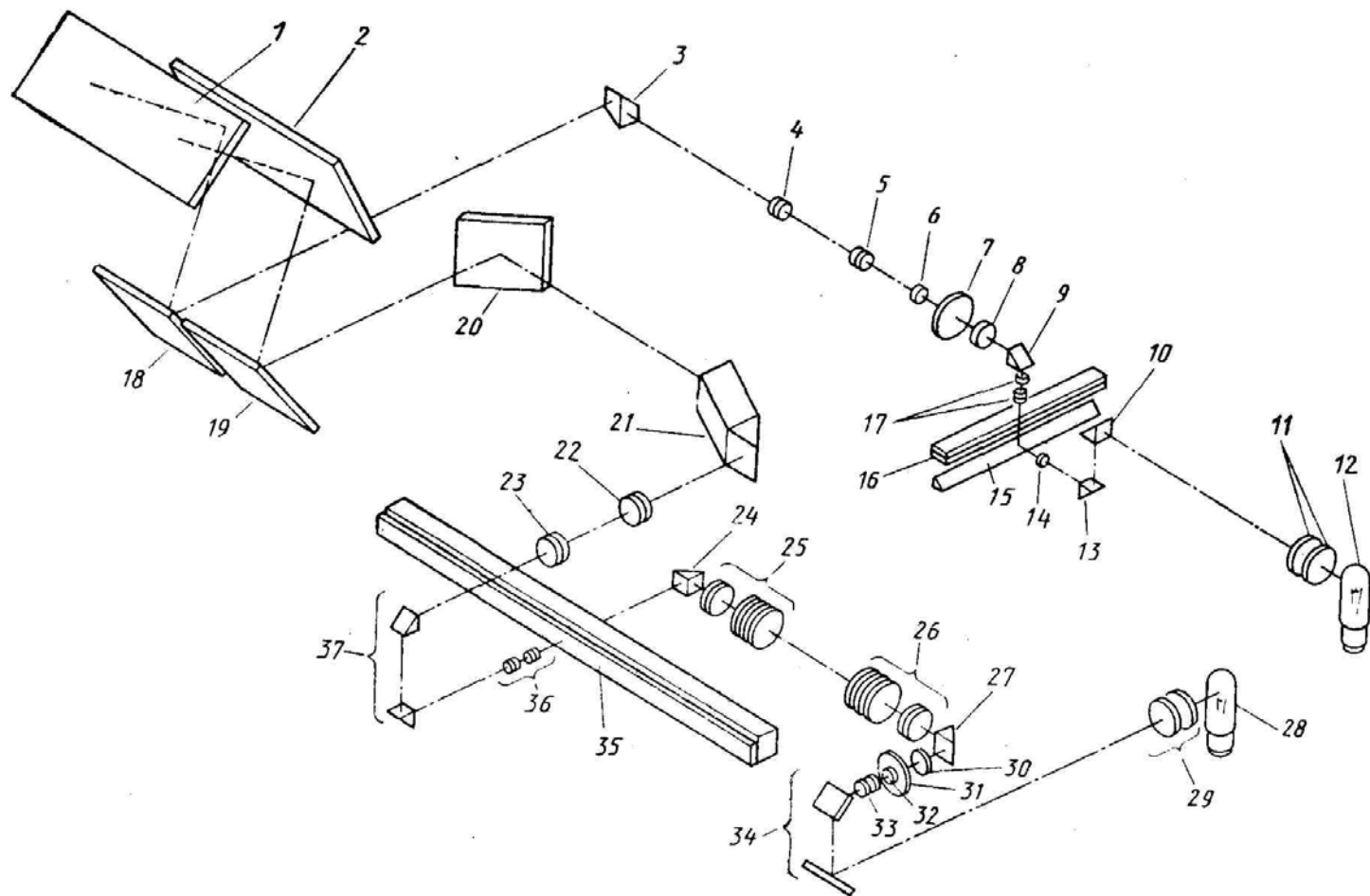


Рис. 2.29. Оптична схема відлікових проєкційних систем переміщення кареток

Плоскопаралельна пластина 8 є оптичним компенсатором. При нахилі її відносно оптичної осі виникає зсув зображення міліметрового штриха у межах 0,1 мм. Колова шкала має 100 поділень, тобто цена поділки шкали є 0,001 мм. Надалі зображення штрихів міліметрової шкали системою, що має колектив 6, лінзи 4 та 5, призму 3, дзеркала 2 та 18, проектується на екран 1.

Аналогічно побудовано оптичну схему відлікової проекційної системи шкали продовжнього ходу. Оптична система містить джерело світла 28, конденсор 29, дзеркала 34 та об'єктив 33. Вона призначена для освітлення сіток з бісектором 32 та коловою шкалою 31. Поряд із коловою шкалою розташовано плоскопаралельну пластину 30, яка є оптичним компенсатором. Зображення штрихової сітки та колової шкали системою, яка містить призму 27, об'єктиви 25, 26 та призму 24, проектують у площину міліметрової шкали 35 продовжнього ходу. Надалі через систему, яка містить об'єктив 36, призму 37, лінзи системи обертання 22 та 23, призму 21 та дзеркала 2, 19, 22, зображення штрихів сітки, а також колової та міліметрової шкал проектується на екран 1.

УИМ-24 має підйомний пристрій для деталей масою до 100 кг; діапазон вимірювань в подовжньому напрямі складає від 0 до 500 мм, а в поперечном— 0...200 мм; ціна ділення відлікових пристроїв проекційного типу рівна 1 мкм. Універсальність забезпечується різноманітним приладдям, у комплект яких входять круглий робочий стіл СТ9, стіл з високими центрами СТ-2, вимірювальна бабка ИБ-21 тощо.

Додатково до універсального вимірювального мікроскопа УИМ-24 випускається круглий стіл СТ-24 та вимірювальна бабка ИБ-24. Ці пристосування дозволяють підвищити точність кутових вимірів, так як ціна найменшої поділки відлікового пристрою, дорівнює 5", а похибка вимірювальної бабки та столу не перевищує  $\pm 10''$ .

Круглий стіл СТ-24 призначений для вимірювання кутів різноманітних виробів: калібрів, шаблонів, лімбів тощо, а також для вимірювань в полярних координатах. Вимірювальна бабка ИБ-24 використовується для кутових вимірювань виробів, що встановлюються в центрах.

Вимірювальна бабка призначена, зокрема, для вимірювання мітчиків з непарним числом канавок, ходових гвинтів з гайкою, черв'ячних та циліндричних фрез тощо.

### **§ 2.6.1. Методи вимірювання розмірів деталі на мікроскопах**

Вимірювання на мікроскопах можна проводити тіньовим методом в світлі, що проходить, контурним методом у відбитому світлі і методом осьового перетину за допомогою вимірювальних ножей.

У відбитому світлі за допомогою знімного освітлювача вимірюють розміри виробів, які перекриваються виступаючими частинами від світла, що проходить. При вимірюваннях плоскі вироби закріплюють на наочному столі, а циліндрові вироби — в центрових бабцях, на призмах і інших пристосуваннях.

Перед вимірюванням плоских виробів діафрагму освітлювача встановлюють на діаметр від 20 до 25 мм.

При вимірюванні циліндрових виробів діаметр діафрагми вибирають по спеціальній таблиці. Об'єктив наводять на площину, в якій виконують вимірювання. Положення виробу регулюють так, щоб вимірюваний розмір спостерігався в окулярну головку, а напрям розміру співпадав з напрямом переміщення столу.

Для циліндрових (гладких і різьбових) виробів фокусування об'єктиву і вивірення напрямку осі виробу здійснюють по контрольному валику, встановленому в центрах.

Процес вимірювань полягає в поєднанні штрихових ліній окулярної сітки з лініями контура виробу, що обмежують розмір, що перевіряється. Точність поєднання штрихових ліній значно вища, ніж суцільних.

При поєднанні одна половина лінії повинна знаходитися в межах тіньового контура, а інша — поза ним.

При лінійних вимірюваннях, наприклад діаметру калібру-пробки, поєднання добиваються шляхом послідовних переміщень столу в поперечному або подовжньому напрямках. Вимірювана довжина рівна різниці показань мікрометричних пристроїв або відлікових мікроскопів при двох поєднаннях з кожного боку розміру.

При кутових вимірюваннях поєднання забезпечується поворотом окулярної головки візирного мікроскопа і переміщеннями столу (див. рис. 2.24). Наприклад, лінійні і кутові вимірювання на мікроскопах виконуються при перевірці основних розмірів різьби.

Для перевірки різьбових, радіусів і інших профілів на мікроскопах застосовують револьверні головки, окулярні сітки яких показані на рис. 2.30. Суміщуючи контур виробу з відповідним профілем на окулярній сітці, можна перевірити правильність параметрів різьби 1 або радіус кривизни виробу 2.

На мікроскопах вимірюють плоскі вироби, наприклад шаблони з складним контуром, розміри яких на кресленні задаються у вигляді координат, відлічуваних від якої-небудь крапки. Такі вимірювання проводять в прямокутних або полярних координатах.

При вимірюваннях в прямокутних координатах виріб ОАВС встановлюють базовими сторонами ОА і ОС паралельно напрямкам переміщення столу (рис. 2.31,а). Крапку О суміщають з центром перехрестя окулярної сітки і записують показання відлікових пристроїв. Переміщаючи стіл, суміщають перехрестя з крапками 1, 2, 3... профілю.

За різницею показань відлікових пристроїв визначають дійсні розміри профілю:  $x_1, x_2, x_3, \dots, y_1, y_2, y_3$ ,

Набутих значень координат порівнюють із заданими на кресленні.

При вимірюваннях в полярних координатах (рис. 2.31,б) виріб ОАВ встановлюють так, щоб початкова точка О співпала з центром столу і перехрестям окулярної сітки.

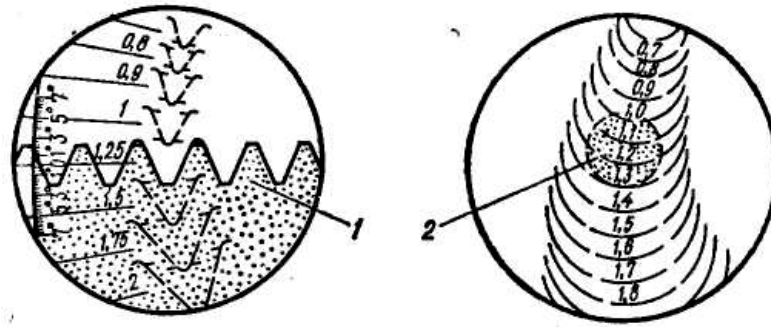


Рис. 2.30. Окулярні сітки револьверної голівки

Стіл повертають на кути  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , - так, щоб напрями ліній  $O1, O2, O3 \dots$  співпадали з поздовжнім переміщенням столу. За різницею показань мікрометра визначають довжину радіусів  $r_1, r_2, r_3$ . Набутих значень координат  $\varphi$  і  $r$  порівнюють із заданими.

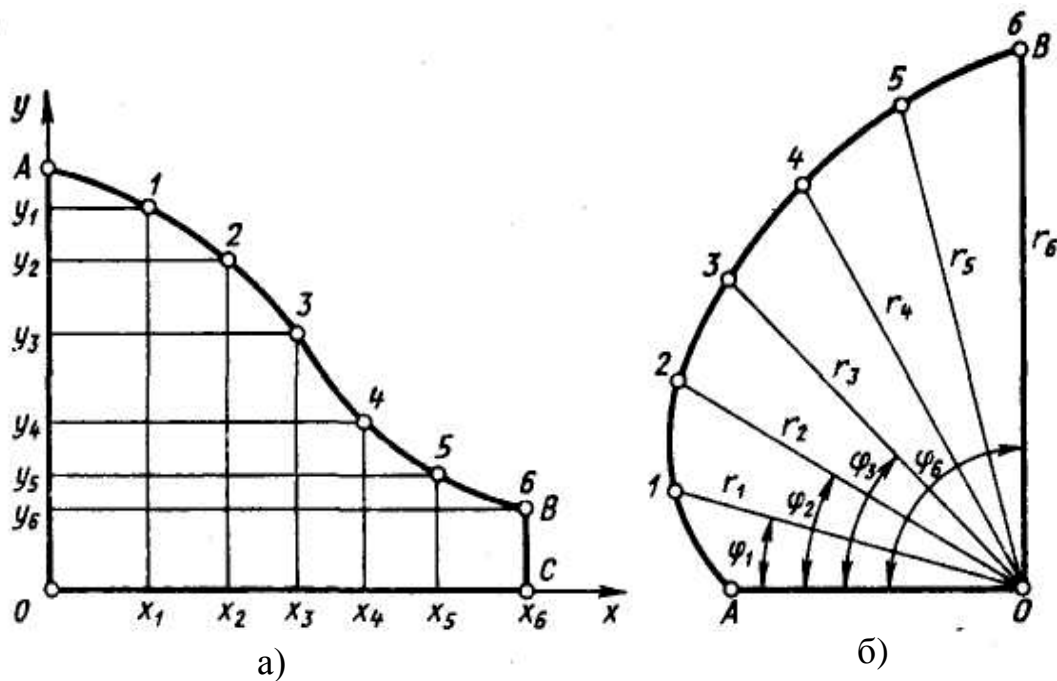


Рис. 2.31. Вимірювання профілей шаблонів у координатах: а — прямокутних; б — полярних

Розглянуті типи мікроскопів і досі є найбільш застосованими вимірювальними оптичними приладами, що поширені у машинобудівній та приладобудівній промисловості для контролю якості точних деталей.

## § 2.7. Проектори

Вимірювальні проектори призначені для вимірювань і контролю лінійних і кутових розмірів виробів з складним контуром: профільних шаблонів, дрібномодульних зубчатих коліс, різального інструмента, різьбових виробів і тому подібне. Проектори дозволяють отримувати на екрані збільшене зображення контура виробу при вимірюваннях в світлі (діаскопічна проекція), що проходить, або зображення поверхні виробу при вимірюваннях у відбитому світлі (епіскопічна проекція). Другий метод менш точний, його застосовують, наприклад, коли необхідно зміряти розмір на поверхні виробу.

**Великий проектор (ВП)** має освітлювальну та проекційну оптичні системи (рис. 2.32,а).

Освітлювач складається з лампи 1, конденсора 2, світлофільтру 3, змінного конденсора 4 і дзеркала 5. Паралельні промені освітлюють вимірюваний виріб 7, встановлене на наочному склі 6. Тіньовий контур виробу відбивається від дзеркала 8 і проектується об'єктивом 9 через призму 10 і дзеркало 11 на екран 12.

Збільшення змінних об'єтивів 9 складає 10, 20 і 50х. Кожному об'єктиву відповідає свій змінний конденсор 4, що забезпечує рівномірне освітлення об'єктиву.

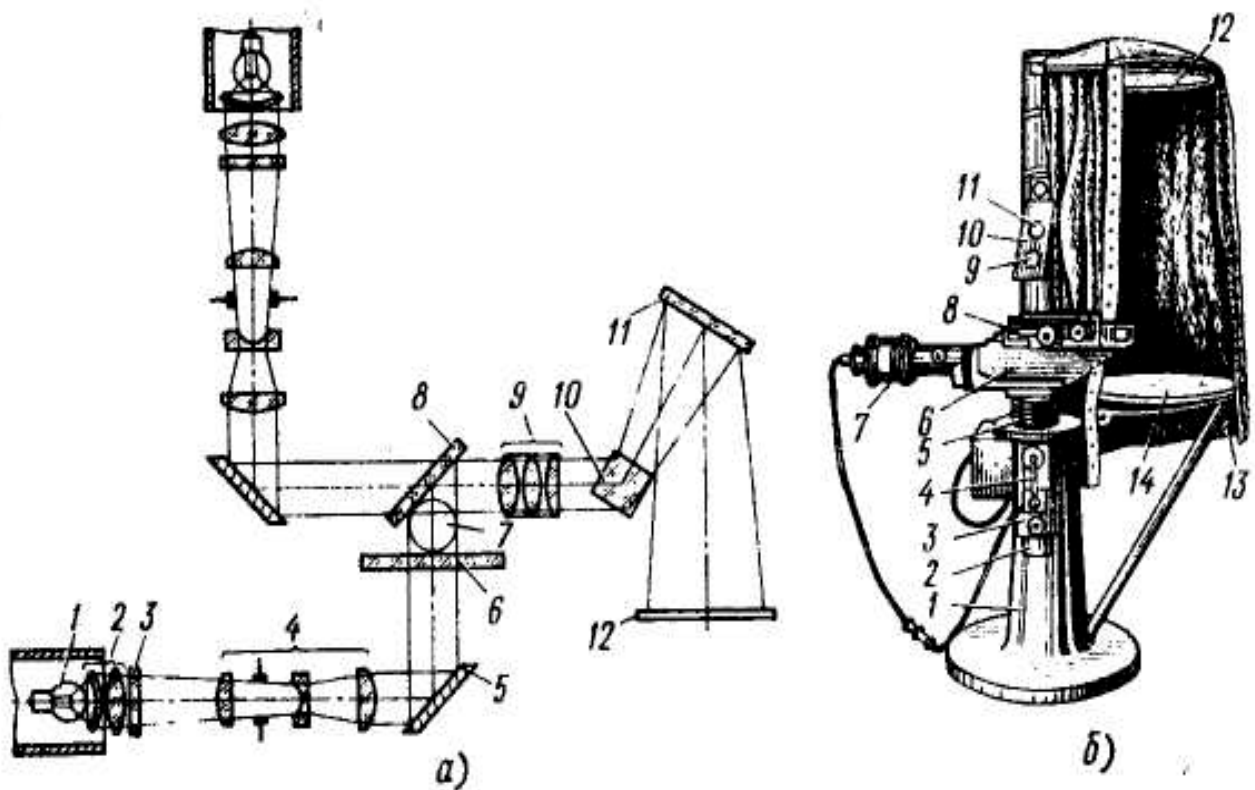


Рис. 2.32. Великий проектор БП: а — оптична схема; б — зовнішній вигляд

При вимірюваннях у відбитому світлі замість дзеркала 8 використовують напівпрозоре скло. Промені світла проходять через скло, відбиваються від поверхні виробу 7 і поверхні напівпрозорого скла і потрапляють в об'єктив 9. Зображення на екрані виходить менш чітке.

Проектор БП (рис. 2.32, б) має станину 1 із стійкою 3, усередині якої штурвалом 5 при звільненому стопорі 4 переміщується вертикальна колонка 2. На колонці встановлена підставка 6 вимірювального столу 8 з освітлювачем 7. На середній частині станини є патрубок, в якому кріпляться об'єктиви 9 і револьверний пристрій 10 із змінними дзеркалами 11. У верхній частині станини на кронштейні встановлено дзеркало 12 та передбачена драпіровка 13 для затемнення екрану 14. Діаметр екрану рівний 600 мм.

Конструкція та основні метрологічні показники відлікових пристроїв вимірювального столу проектора такі ж самі, як у мікроскопа БМИ.

Освітлювач 7 проектора можна встановити так, щоб виріб освітлював збоку горизонтальними потоками світла, які спрямовані безпосередньо в об'єктив 9. Револьверний пристрій при цьому повертають на  $90^\circ$  і відкривають об'єктив. При вимірюваннях у відбитому світлі освітлювач 7 встановлюють вертикально над револьверним пристроєм, в якому дзеркало 11 замінюють напівпрозорим дзеркалом, що проводить світло на поверхню виробу. Промені, відбиті від виробу, через напівпрозоре дзеркало, спрямовані в об'єктив 9.

Фокусування об'єктиву 9 на виріб перед вимірюванням здійснюють вертикальними переміщеннями столу штурвалом 5.

Різкість зображення тіньового контура виробу на екрані регулюють, змінюючи діаметр діафрагми конденсора 4.

Для вимірювання довжини і кутів виробів на екран 14 нанесені штрихові перехрестя, напрям ліній якого співпадає з напрямом переміщень столу, і дві суцільні лінії, що проходять через центр перехрестя під кутом  $60^\circ$  одна до іншої.

**Годинниковий проектор типу ГП** використовують для контролю і вимірювань дрібних виробів.

Лампа 1 (рис. 2.33, а) через конденсор 2 зі світлофільтром 3 освітлює виріб, встановлений на робочому столі 4. Об'єктив 5 із захисним склом 6 через дзеркало 7 проектує тіньовий контур виробу на екран 8. При роботі у відбитому світлі виріб освітлює знизу через предметне скло спеціальним освітлювачем.

На корпусі 1 проектора (рис. 2.33, б) встановлені змінний об'єктив 3 і стійка 10, на якій закріплені освітлювач 7 і вимірювальний стіл, що переміщується, 5 з предметним склом. Стіл має поздовжній 11 і поперечний 4 мікрогвинти. Маховик 8 переміщує стіл вертикально при фокусуванні об'єктиву. Змінні конденсори 6 встановлені на поворотному револьверному пристрої 9, вони мають збільшення  $10^\times$ ,  $20^\times$ ,  $50^\times$ ,  $100^\times$  і  $200^\times$ .

Розміри екрану 2 складають 560х460 мм.

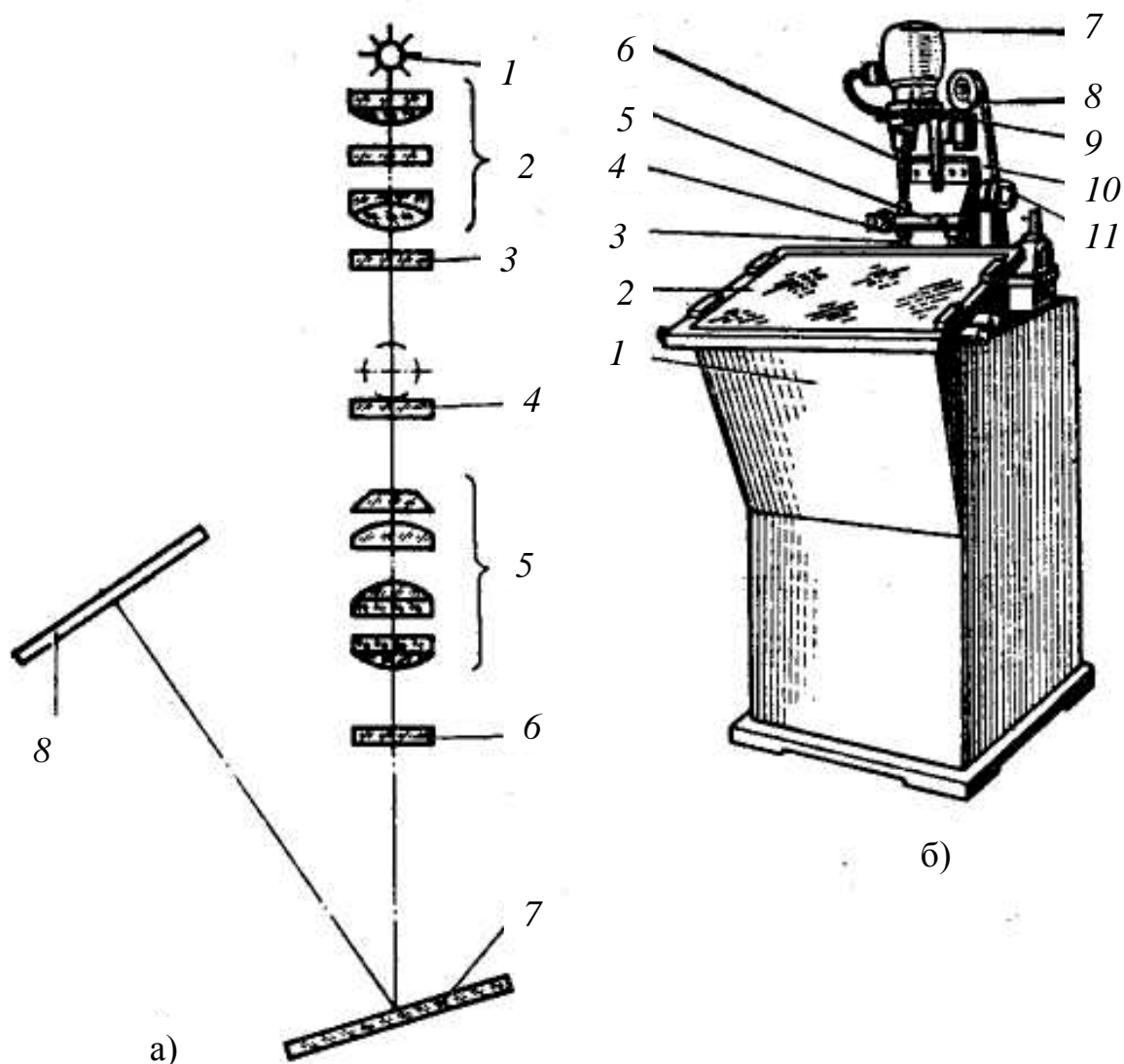


Рис. 2.33. Годинниковий проектор: *а* — оптична схема; *б* — зовнішній вигляд

Для контролю і вимірювання виробів на проекторах використовують наступні методи:

1) поєднання проектованого контура з номінальним контуром виробу, виконаним в масштабі, відповідному збільшенню об'єктиву;

2) порівняння зображення з кресленням, на яке нанесено два контури виробу, відповідні його граничним розмірам; профіль придатного виробу повинен розташовуватися між його граничними контурами;

3) вимірювання розмірів контура виробу за допомогою мікрометричних пристроїв вимірювального столу;

4) вимірювання відхилень зображення контура від зразкового профілю за допомогою вимірювального столу або масштабної лінійки.

Креслення виробу виготовляють на ватмані, плівці, целофані, плексигласі та укріплюють на екрані. Збільшення об'єктиву слід вибирати так, щоб можна було спостерігати весь вимірюваний розмір. Процес вимірювань на проекторах аналогічний вимірюванням на мікроскопах.

Проектори масового контролю ПМК виробів засновані на методі сумісності.

Промені світла від лампи 1 (рис. 2.34,а) через конденсор 2 освітлюють виріб АВ. Об'єktiv 3 проектує тіньовий контур через дзеркала 4 і 5 на екран 6, розташований над об'єктивом.

Якщо поверхня дзеркала перпендикулярна до вісі об'єктива, то на екран проєкціюється тіньовий контур  $A'B'$  виробу і екран затемнений. За зразком виробу угол поворота дзеркала вибирають таким чином, щоб лінії контура  $A'$  і  $B'$  зійшлись на одній лінії К екрана. При цьому екран освітлюється рівномірно полутінню: одна половина екрана освітлена дзеркалом 4, а друга — дзеркалом 5.

При заміні зразка випробуванням виробом СД великого розміру на екрані появиться темна смуга  $K1K2$ . Відповідно, якщо розмір виробу менше зразка, то на екрані появляється світла смуга за рахунок наложення світових потоків від двох дзеркал.

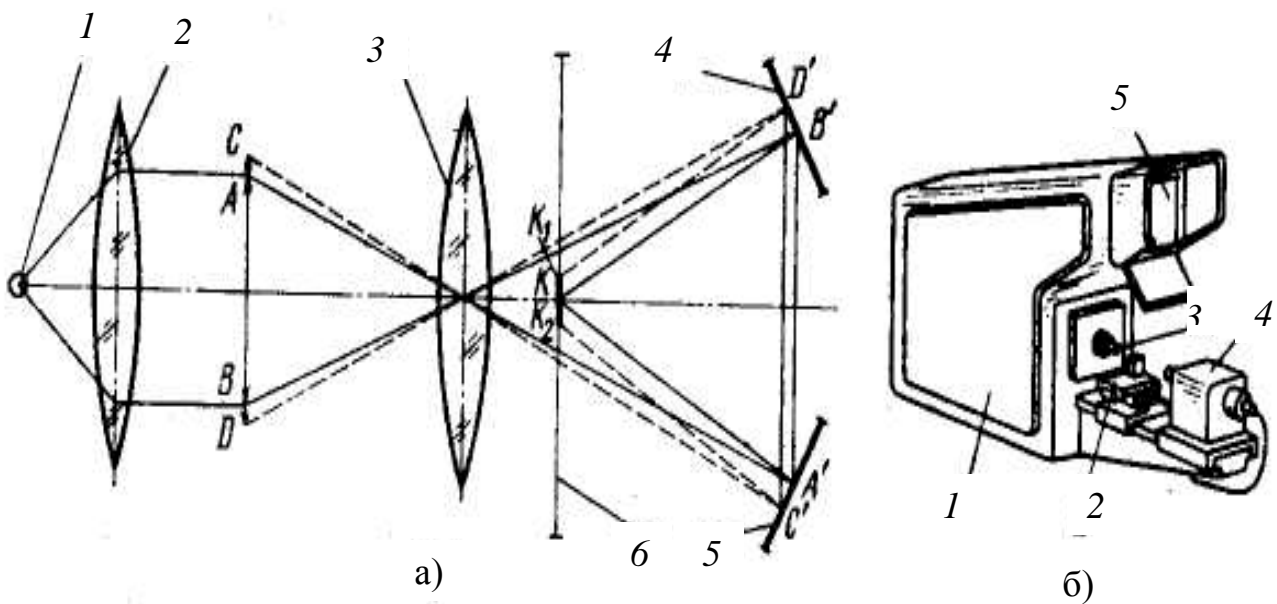


Рис. 83. Проектор масового контролю ПМК: а — оптична схема; б — зовнішній вигляд

Ширина затемнених і освітлених смуг на екрані  $l = \Delta l \cdot \tilde{\Gamma}$ , где  $\Delta l$  — відхилення розміру виробу зразка;  $\tilde{\Gamma}$  — збільшення проектора.



Для контролю використовують дві пари дзеркал, перша з яких наставляється за найменшим допустимим розміром виробу, другу — за найбільшим. Світлова смуга для першої пари дзеркал і темна смуга для другої пари свідчать про відбраковку.

Проектор (рис. 2.34,б) складається з корпусу 1, робочого столу 2, освітлювача 4, об'єктиву 3 і екрану 5. Усередині корпусу у задньої стінки встановлено дві вертикальні штанги, по яких можуть переміщатися і фіксуватися в потрібному положенні утримувачі дзеркал.

На проекторі можна одночасно контролювати до п'яти розмірів. Для кожного розміру використовуються дві пари дзеркал. Дзеркала можна повертати навколо горизонтальної осі для зближення окремих зображень на екрані і навколо вертикальної осі — для настройки за розміром.

Проектор для контролю різьби в сполученні з убудованим пристосуванням призначений для контролю сортування деталей по середньому діаметрі різьби, зовнішніх і внутрішніх діаметрів валів, висот і т.п. На проекторі можна контролювати одночасно 4-5 параметрів.

Прилад може бути використаний для контролю зовнішньої різьби шпильок по середньому діаметрі.

Проектор (рис. 2.35) складається з корпусу 5, екрана 3, об'єктива 6, дзеркала й освітлювальної системи 1, що складає з конденсора 2, тримача патрона й лазера. На екрані за допомогою еталонних різьбових калібрів наносяться три лінії 4, що позначають розміри діаметра різьби шпильок по сортувальних групах.

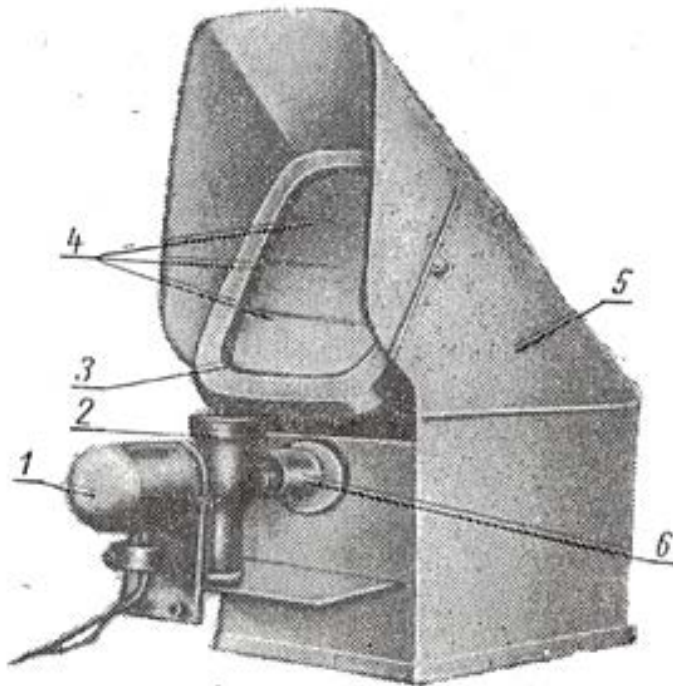


Рис. 2.35. Проектор зі спеціальним пристосуванням для контролю різьби

Збільшення об'єктива проектора є змінним та таким, що змінюється від  $20^{\times}$  до  $60^{\times}$ .

Збільшення проектора із застосуванням пристосування 6 для контролю різьби до  $300^{\times}$ . Для одержання такого збільшення в пристосуванні застосовується механічний важіль зі співвідношенням плечей 5:1.

Поле зору об'єктива проектора до 8 мм. Розмір екрана 130x200 мм. Погрішність виміру (при збільшенні  $200^{\times}$ ) не перевищує 0,01 мм. Продуктивність контролю від 2500 до 2820 шпильок у зміну. Габарити проектора: 200x500x550 мм.

Конструкція пристосування залежить від типу, розмірів деталей і контрольованих елементів.

Спеціальне пристосування до проектора для контролю й сортування зовнішньої різьби складається із двох обойм: верхньої й нижньої. В обойми закріплюються дротики відповідного діаметра для виміру середнього діаметра різьби: одна у верхню обойму й дві в нижню. Нижня обойма пов'язана з вимірювальним штоком, що перебуває в постійному контакті з хитним важелем і показчиком.

Нижня обойма в момент установки контрольованої деталі приділяється в неробоче положення за допомогою рукоятки, а потім пружиною притискається до зіткнення з контрольованою різьбою. Переміщення вимірювального штока при зміні розміру середнього діаметра різьби передається на показчик, тінь якого, проектуючись на екран, визначає групу деталі.

За допомогою проекторів у виробництві контролюють граничні лінії елементів квазіперіодичної структури ліній затримки (ЛЗ). Змінюючи кратність збільшення приладу можна розглядати та аналізувати окремі ділянки, або в цілому всю структуру ЛЗ. Проте цей метод вимірювань у даному випадку не забезпечує достатньої точності та якості деталей, як буде показано далі.

Максимальне збільшення проекторів, що серійно випускають промисловість, сягає  $200^{\times}$ , що дозволяє визначити похибки виготовлення елементів квазіперіодичної структури ЛЗ порядку 4 мкм.

Для підвищення продуктивності процесу й здійснення комплексного контролю порівнюють спроектований контур ЛЗ із так названим “білком” - кресленням ЛЗ у збільшеному масштабі на екрані з координатною сіткою для виміру величини розмірів  $a$  й  $b$ .

В умовах серійного виробництва ЛЗ для поліпшення збереження та виключення деформації креслення замість “білків” застосовують їхні фотошаблони, які виконують на склі.

Для виготовлення фотошаблону засвітлюють і проявляють фотопластинку, на якій потім тонким різцем прокреслюють профіль ЛЗ у необхідному масштабі. З метою забезпечення високої точності, цю операцію виконують на координатно-розточувальному верстаті. З отриманого негатива виготовляють друкованим способом діапозитивні зображення ЛЗ на склі. Окрім того, для

виготовлення таких шаблонів можна застосовувати нові комп'ютерні технології виготовлення, що є більш точними та надійними методами.

Контроль ЛЗ за допомогою проекторів є більше високопродуктивним, чим за допомогою мікроскопів, а також менше впливає на зір контролерів-операторів технологічного контролю. Але йому властиві істотні недоліки, серед яких головним є практична складність автоматизації процесу контролю.

У процесі контролю виникає також необхідність статистичної обробки результатів вимірів для визначення СКО  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$  розмірів  $a$  й  $b$ .

Тому в умовах серійного виробництва ЛЗ на перший план метрологічного забезпечення їхнього контролю виходить проблема створення вимірювальних систем для контролю статистичних характеристик розмірів  $a$  й  $b$  структури ЛЗ.

Вони за своїм принципом дії є фотоелектричними вимірювальними приладами й можуть бути побудовані на базі скануючих фотометричних мікроскопів, або лазерних дифрактометрів.

Практичне застосування цих систем повинне забезпечувати:

- скорочення часу виміру розмірів  $a$  й  $b$ , а також часу на їхню статистичну обробку;
- усунення впливу рівня підготовки метрологів на надійність процесу контролю;
- підвищення вірогідності виміру розмірів  $a$  й  $b$  внаслідок їхнього виміру в декількох перетинах на висоті  $h$  зубів ЛЗ;
- зниження втомленості зору оператора-метролога ОТК.

## **Перелік літератури до розділу 2**

- 2.1. Васильев А.С. Основы метрологии и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.: ил.
- 2.2. Ознобишин Н.С., Лурье А.М. Технический контроль в механических цехах. – М.: Высшая школа, 1979. – 220 с.
- 2.3. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. - М.: Машиностроение, 1985.
- 2.4. Юу Ф. Введение в теорию дифракции, голографию и обработку информации, пер. с англ. - М.: Мир, 1979.
- 2.5. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике, пер. с англ. М.: Сов.радио, 1972.
- 2.6. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. - Л.: Машиностроение, 1977.
- 2.7. Порфирьев Л.П. Теория оптико-электронных систем и приборов. - Л.: Машиностроение, 1980.
- 2.8. Васильев Л.А., Ефимов И.В. Интерферометр с дифракционной решеткой. - М.: Машиностроение, 1976.
- 2.9. Ландсберг Г.С. Оптика. - М.: Наука, 1976.
- 2.10. Сороко Л.М. Основы когерентной оптики и голографии. - М.: Наука, 1971.
- 2.11. Браславский Д.А., Петров В.В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976.
- 2.12. Коротков В.П., Тайц Б.А. Основы метрологии и теория точности измерительных устройств. - М.: Изд-во Стандартов, 1978.

## **РОЗДІЛ 3. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ**

Оптико-електронні пристрої широко використовуються для контролю виробничих процесів та їх автоматизації. Вони відрізняються простотою та надійністю конструкції, малими габаритами та масою, високою чутливістю та швидкістю. За частими застосуваннями є суттєвою відсутність контакту з деталлю.

Частина оптико-електронного пристрою, що слугує для перетворення вимірюваної величини в електричний сигнал, є чутником. Чутник містить фотоприймач та оптико-механічну систему, яка перетворює вимірювану величину у змінення світлового потоку. За величиною цього змінення визначають корисну інформаційну складову.

### **§ 3.1. Оптико-електронні прилади для вимірювання лінійних величин**

У точному машинобудуванні та приладобудуванні фотоелектричні чутники використовуються в основному при вимірюваннях лінійних розмірів, переміщень, шорсткості поверхні деталі, координат. Вони використовуються також при контролі розмірів виробів у процесі їх виготовлення.

Фотоелектричні чутники застосовуються при регулюванні виробничих процесів, розбраковці та рахуванні кількості виробів, сигналізації, для підвищення точності вимірювань та створення багатьох автоматичних пристроїв, частина яких розглядається в цьому розділі. При цьому основна увага приділяється способам побудови приладів та їх техніко-економічним характеристикам, а не їх детальному опису та аналізу.

Фотоелектричні чутники лінійних величин є різноманітними за конструкцією та принципом дії. Кількість різноманітних чутників величезна, а класифікація їх важка. Тому обмежимося окремими прикладами, що пояснюють можливості використання чутників для контролю та вимірювання лінійних величин.

#### **§ 3.1.1. Фотоелектричні мікроскопи**

Найбільш точні лінійні вимірювання проводяться звичайно за допомогою штрихових мір довжини, що являють собою скляні або металеві шкали з поділками у вигляді тонких штрихів, розташованих на строго певній відстані один від іншого.

При використанні штрихової міри виникає необхідність точного сполучення базової лінії приладу зі штрихом: наведення на штрих. Переміщаючи каретку будь-якого приладу між двома штрихами, можна судити про величину переміщення. Щораз необхідно буде робити точне

наведення на штрих. Для здійснення цього використовуються фотоелектричні мікроскопи.

Схема одного з таких мікроскопів [3.1] наведена на рис. 3.1,а. Світло від джерела випромінювання 1 через щілину 2 досягає дзеркала 3.

Воно закріплено на якорі вібратора, живлення якого здійснюється від генератора низької частоти. Оптична система проєцює зображення щілини 2 через конденсор 5 на площину штрихової міри 4. Зображення щілини робить коливання поблизу штриха міри за рахунок рухів дзеркала 3. Відбитий від поверхні міри світловий пучок попадає на фотопомножувач. За один період коливання дзеркала зображення щілини перетинає штрих міри двічі: при прямому та зворотному ході. При кожному збігу зображення щілини зі штрихом величина відбитого світла зменшується та на виході фотопомножувача виникає короткочасний імпульс напруги.

Якщо відхилення зображення щілини відбуваються симетрично щодо штриха, що відповідає точному наведенню, то імпульси будуть чергуватися через рівні проміжки часу кожную половину періоду. Якщо штрих небагато зсунутий, то часове положення імпульсів зміниться. На рис. 3.1, б показане розгорнення зображення щілини  $l'$  у часі. Крапки позначають моменти виникнення імпульсів. Зсув штриха при наведенні не перевищує амплітуди коливань зображення щілини.

У реєструючому пристрої виробляється відлік часового положення імпульсів. На виході реєструючого пристрою включений прилад, нульові показання якого відповідають точному наведенню на штрих.

У фотоелектричному мікроскопі з описаною оптичною схемою похибка наведення на штрих становить 0,05 мкм; поле зору приладу 200-300 мкм. Частота генератора опорної напруги, що живить вібратор - 70 Гц.

Застосовуються системи, у яких відсутні механічні елементи, що рухаються, що значно підвищує надійність роботи приладу. Один з таких приладів — фотоелектричний мікроскоп з розгортаючим електрооптичним пристроєм.

Цей пристрій використовує розкладання в спектр світла зондувального джерела, та зміна інтенсивності різних ділянок спектра залежно від зміни напруги живлення джерела пояснює рис. 3.1,в. Джерелом зондувального випромінювання 1 є лампа розжарювання, що живиться змінним струмом. При такому живленні відбувається періодичний перерозподіл інтенсивності між спектральними складовими, тому що змінюється температура нитки.

Світловий потік від лампи 1 через конденсор 2, щілинну діафрагму 3 та об'єктив 4 попадає на призму 5 (диспергуючий елемент). Зображення діафрагми встановлюється строго паралельно штриховій рисці на об'єкті, що вимірюється 8, на котрий об'єктивом 6 фокусується розкладання в спектр випромінювання.

При періодичній зміні температури нитки лампи ділянка зображення з максимальною освітленістю робить зворотньо-поступальний рух по поверхні

об'єкта 8. При перетинанні штриха виникає імпульс.

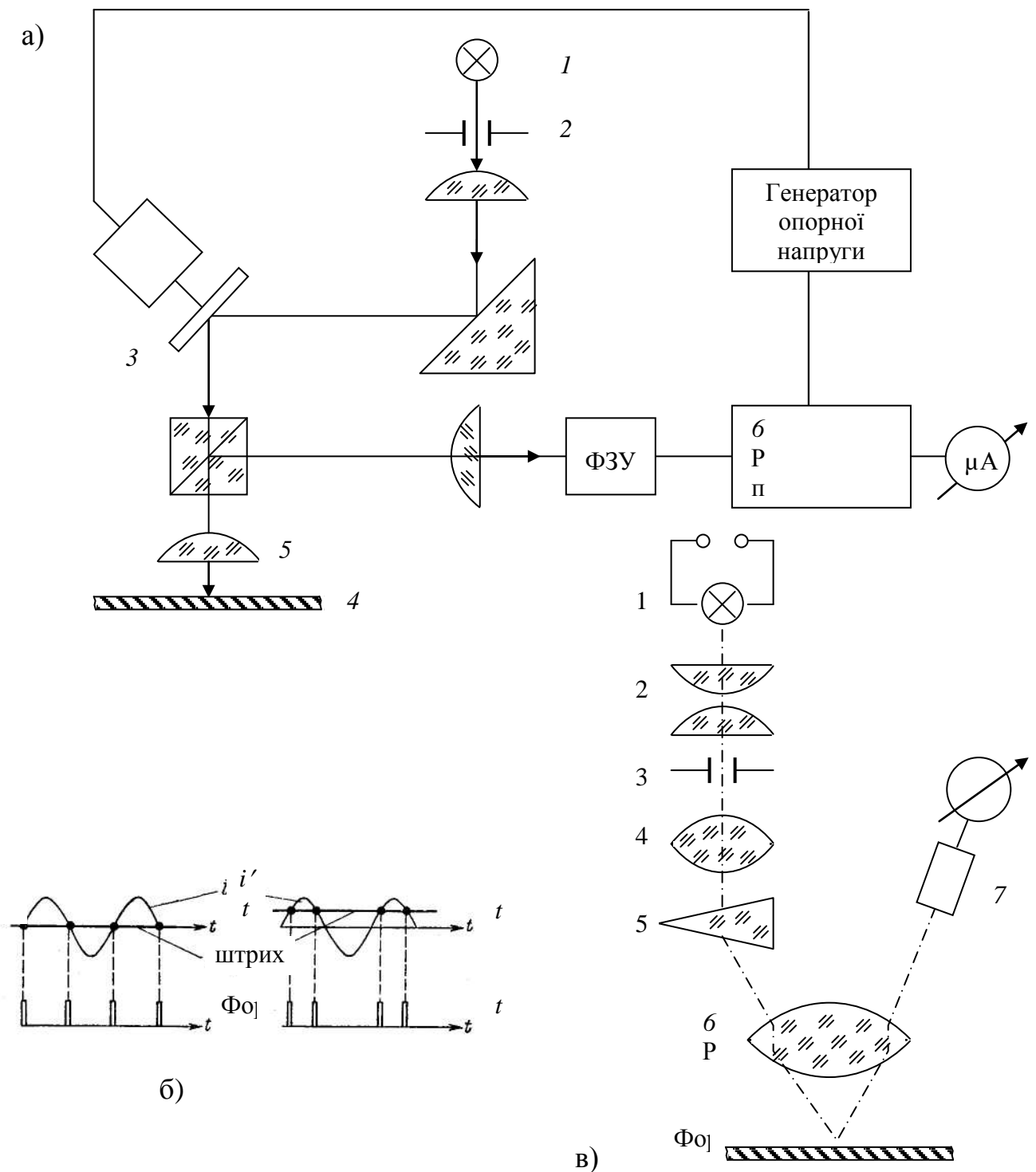


Рис. 3.1. Принципова схема фотоелектричного мікроскопу з дзеркалом, що коливається (а), та електрооптичним розгортаючим пристроєм (в); часове положення електричних імпульсів при різних положеннях штриха (б)

Зображення штрихової риски через той же об'єктив 6 надходить на фотоприймач реєструючого пристрою 7. Однакові інтервали між імпульсами будуть тільки у тому випадку, якщо штрих знаходиться на оптичній осі мікроскопа. При зсуві штриха рівномірність слідування імпульсів порушується, що фіксується реєструючим пристроєм.

Відомий фотоелектричний мікроскоп ФЭМ-2, який є призначеним для геометричного контролю розмірів малих об'єктів. В основу роботи мікроскопа покладене формування оптичною системою збільшеного солинейного зображення вимірюваного об'єкта. У площині зображення розташований фотоприймач, вихідний сигнал якого надходить на електровимірювальну апаратуру.

До недоліків цього приладу варто віднести відсутність корекції дрейфу "нуля", мала межа фотоелектричних вимірів (до 10 мкм), ручне керування процесом вимірів й окулярний відлік показань приладу, що не дозволяє використати його в промислових умовах для геометричного контролю надточних деталей.

Зазначені недоліки частково усунуті у фотоелектричному мікроскопі ФЭМ-1Ц, що призначений для вимірів лінійних розмірів малих об'єктів величиною 100 мкм. При цьому дискретність отсчетов становить 0.5 мкм, а максимальна похибка вимірів не більше 0.3 мкм. Цей мікроскоп у колишньому СРСР серійно випускався з 1980 року. Як вихідний індикатор у ньому використовується цифрова відлікова система. Одним з основних недоліків мікроскопа ФЭМ-1Ц є мала швидкодія - час автоматичного наведення на штрих до 20 с, залежність похибки вимірів від якості фокусування оптичної системи, що вимагає практично безперервного візуального контролю якості зображення в окуляр при вимірі об'єктів з великою довжиною. Електронна система мікроскопа не дозволяє виконувати статистичну обробку результатів вимірів. У силу зазначених недоліків вони не знайшли застосування для геометричного контролю надточних деталей.

В.І. Телешевським та Б.М. Потаповим [3.2] було запропоновано оригінальний спосіб наведення на екстремум освітленості об'єкта детектуванням спектрів фотоелектричного сигналу. Спосіб базується на акустичній модуляції світла та базується на тому, що просторово-часове розподілення освітлення на площині контролюємого об'єкта створюється формуванням в цій площині френелівського зображення стоячої хвилі ультразвукової хвилі. Високі частоти (до сотень МГц), що є властивими акустичній модуляції, роблять можливим використання цього способу у фотоелектричному мікроскопі для екстремального наведення на швидкорухомі об'єкти в широкому діапазоні швидкостей переміщень.

Принцип дії фотоелектричного мікроскопа з акустооптичною модуляцією ілюструється на рис. 3.2. Паралельний світловий пучок, що формується джерелом світла 1, щільовою діафрагмою 2 та об'єктивом 3, проходить через акустооптичний модулятор (АОМ) 4. Модулятор являє собою



оптично прозоре тіло, в котрому завдяки електронному генератору 5 та п'єзовипромінювачу 6 на частоті  $f$  збуджується стояча ультразвукова хвиля. У випадку монохроматичного освітлення у фотоелектричному мікроскопі використовується колімований лазерний пучок.

Дифракція світла на стоячій ультразвуковій хвилі в модуляторі призводить до виникнення її френелівських зображень, локалізованих в певних площинах по ходу світлового потоку. В одній із площин локалізації френелівського зображення розташовується об'єкт 7 контролю.

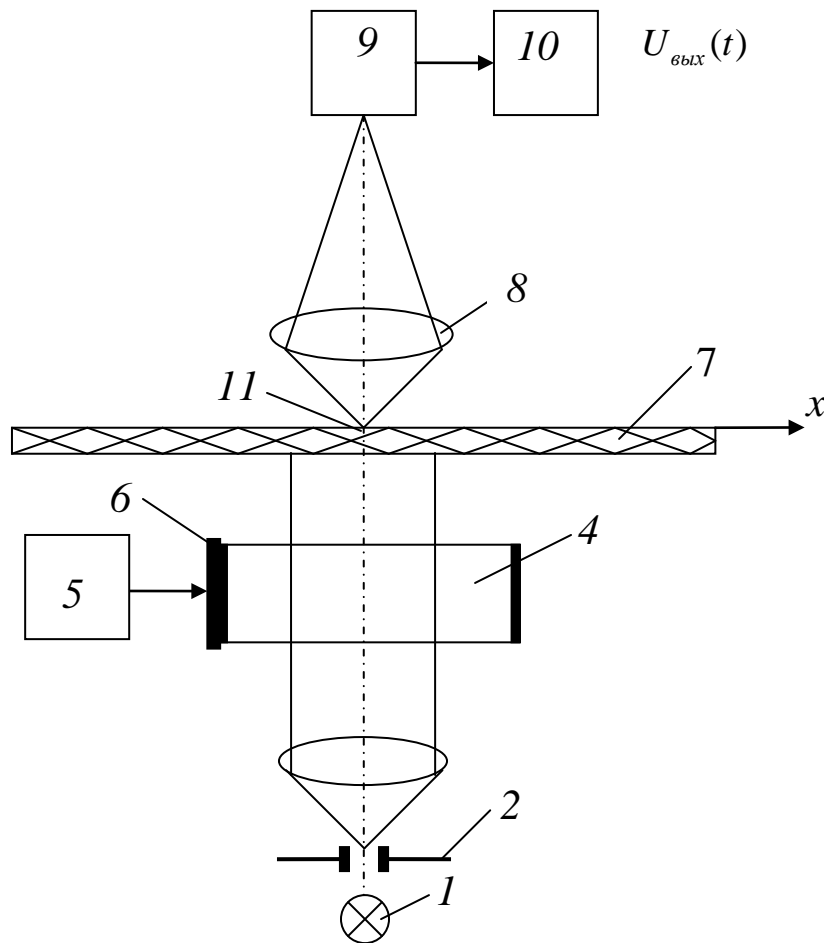


Рис. 3.2. Принципова схема фотоелектричного мікроскопа з акустооптичною модуляцією

Об'єтив 8 формує збільшене зображення об'єкта, що освітлюється модульованим світлом у площині фотоелектричної реєстрації. Сигнал з фотоприймача 9 надходить в пристрій 10, де він підсилюється та детектується в схемі фазового або частотного дискримінатора.

Як приклад розглянуто наведення фотоелектричного мікроскопа на прозорий штрих 11 об'єкта 7.

Стояча ультразвукова хвиля створює в акустооптичному модуляторі 4 розподілення показника оптичного заломлення

$$\Delta n(x) = 2\Delta n_0 \cos(Kx + \psi_1) \cos(\Omega t - \psi_2), \quad (3.1)$$

де  $\Delta n_0$  - амплітуда зміни показника заломлення;

$K$  - хвильове число;

$\Delta$  - довжина ультразвукової хвилі;

$\Omega = 2\pi f$  - колова частота;

$\psi_1$  та  $\psi_2$  - постійні фази.

В наближенні слабкої взаємодії ультразвукової хвилі з плоскою монохроматичною світловою розподілення інтенсивності локалізації френелівського зображення мають вигляд

$$I_\phi(x) = I_0 - I_{\Omega_0} \cos(Kx + \psi_1) \cos(\Omega t - \psi_2) + I_{2\Omega_0} \cos[2(Kx + \psi_1)] \cos[2(\Omega t - \psi_2)], \quad (3.2)$$

де  $I_0$  - складова, постійна за часом;

$I_{\Omega_0}$  та  $I_{2\Omega_0}$  - амплітуди змінних складових з частотами  $\Omega$  та  $2\Omega$  відповідно.

Зображення (3.2) створює просторово-часову модуляцію освітленості на прозорому штриху 11. Останній виконує у фотоелектричному мікроскопі функції вхідної зіниці.

Фотоелектричний сигнал  $U_{\text{вих}}(t)$  визначається інтегруванням інтенсивності (3.2) по площині вхідної зіниці та дорівнює

$$U_{\text{вих}}(t) = U_0 - \frac{2}{K} (-1) U_{\Omega_0} \cos(\Omega t - \psi_2) \sin Kd \sin K\Delta x - \frac{1}{K} U_{2\Omega_0} \cos[2(\Omega t - \psi_2)] \sin 2Kd \cos 2K\Delta x, \quad (3.3)$$

де  $d$  - ширина контролюемого штриха;

$\Delta x$  - зсув вісі симетрії штриха відносно координати вузла стоячої хвилі,

$r = 1, 2, \dots$  - порядковий номер вузла.

Сигналі (3.3) окрім постійної складової  $U_0$  містить першу та другу гармоніки частоти  $\Omega$ .

При  $\Delta x = 0$  в спектрі фотоелектричного сигналу (3) присутня тільки друга гармоніка з частотою  $2\Omega$ . При зсуві штриха вправо чи вліво від вузла стоячої хвилі  $\Delta x \neq 0$  в спектрі сигналу  $U_{\text{вих}}(t)$  з'являється перша гармоніка  $\Omega$ , фаза котрої залежить від напрямку зсуву.

Отже, акустооптичний модулятор 4, виконує у фотоелектричному мікроскопі функції оптичного аналізатору, що забезпечує екстремальне наведення фотоелектричного мікроскопу по величині першої та другої гармонік частоти модуляції.

Проводились експериментальні дослідження фотоелектричних сигналів після їх підсилення в смузі 40 Гц ÷ 30 МГц для випадку наведення фотоелектричного мікроскопа на прозорий штрих при  $\Delta/d = 100$ . Сигнали

отримані із завантаження фотоприймального модулю на основі ФЕУ-60 в пучках випромінювання He-Ne лазера ( $\lambda = 0,6328$  мкм) з АОМ, котрий збуджують на частоті 4 МГц ( $\Delta = 0,4$  мм) при наявності других порядків дифракції.

Стояча хвиля в модуляторі імітувалась двома просторово рознесеними назустріч хвилями однієї частоти. амплітуда фазової модуляції світла на кожній з хвиль  $a = 0,8$  рад. Частота сигналу  $U_{\text{аєо}}(t)$  дорівнювала 8 МГц. Відношення сигнал/шум у смузі частот  $\Delta f = 10$  кГц для першої та другої гармонік фотоелектричного сигналу відповідно дорівнюють 60 та 20. Чутливість фотоелектричного мікроскопа до переміщення, що була досліджена у білому світлі, складає 150 мкВ/мкм для першої гармоніки сигналу.

Фотоелектричний мікроскоп з акустооптичним аналізатором може використовуватись для наведення на непрозорі штрихи. В цьому випадку перед фотоприймачем розташовується прямокутна діафрагма, що визначає вхідну зіницю фотоелектричного мікроскопа. Діафрагма розташовується таким чином, щоб вісь зіниці співпала з вузлом стоячої хвилі. Зсув штриха відносно осі зіниці призводить до описаної вище зміни амплітуди та фаз гармонік сигналу  $U_{\text{аєо}}(t)$ .

Періодичність френелівського зображення стоячої хвилі дозволяє застосовувати акустооптичний аналізатор для наведення на растрові об'єкти аналогічно методу, розглянутому в [3.3]. В цьому випадку необхідно оптично узгодження шага растру з шагом френелівського зображення.

### § 3.1.2. Телевізійні мікроскопи

Як раніше вказувалось (див. розд. 1), найпростіший телевізійний мікроскоп являє собою поєднання оптичного мікроскопа з телевізійним каналом, де вимірювання здійснюються візуальним способом, і не може бути віднесений по прийнятій класифікації до фотоелектричних приладів. Телевізійні фотоелектричні вимірювачі лінійних розмірів можуть бути побудовані по двох різних схемах: з проекцією зображення на передавальну телевізійну трубку і з скануванням оптичного променя.

Перший тип телевізійних вимірювальних пристроїв є більш поширеним, зокрема існує достатньо багато спеціалізованих телевізійних вимірників лінійних розмірів елементів прецизійних деталей після механічної обробки. В даний час серійно випускається декілька моделей автоматичних телевізійних вимірників лінійних розмірів.

Одним з перших і типових приладів цього класу є відомий прилад моделі 158А, що випускається фірмою ITR Inc. Він складається з наступних основних блоків: оптичного мікроскопа, телевізійної камери, детектора, генератора рахункових імпульсів, обчислювача, відеоконтрольного пристрою. Принцип роботи таких фотоелектричних телевізійних вимірювальних пристроїв ілюструється рис. 3.3 [3.4].

Збільшене зображення вимірюваного об'єкту будується за допомогою мікрооб'єктиву на фоточутливому шарі приймальної телевізійної трубки. Тривалість відеосигналу пропорційна лінійному розміру зображення елементу.

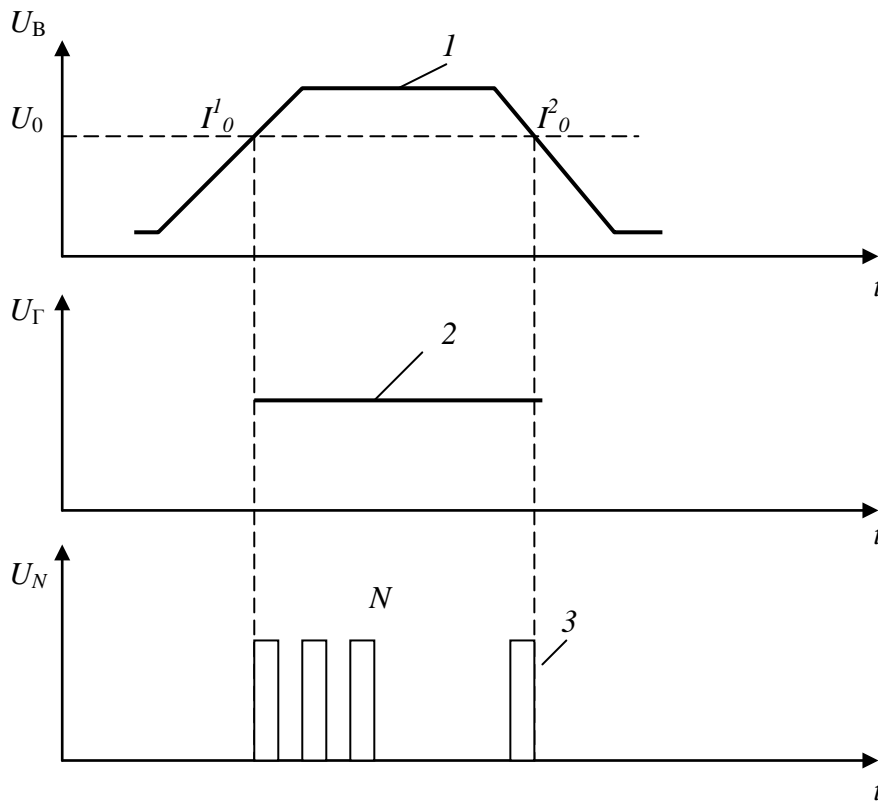


Рис. 3.3. Принцип вимірювання розмірів фотоелектричним методом

Детектор подає лічильникові імпульси від генератора в обчислювальний блок за час, поки амплітуда сигналу перевищує порогові значення  $U_0$ , відповідне положенню точки  $I_0$  на кривій розподілу енергії в зображенні краю елементу. Число імпульсів генератора  $N$ , що надійшли в обчислювач, залежить від вибору порогу спрацьовування детектора  $U_0$ , тривалості сигналу, лінійності рядкової розгортки: 1—відеосигнал з телевізійної камери; 2 – сигнал детектора; 3 – вихідний сигнал на обчислювальний блок).

Оскільки, результати вимірювань визначаються числом імпульсів  $N$ , то для забезпечення високої точності вимірювань необхідно: точно визначати рівень детектування і забезпечувати його постійність: знати крутизну відеосигналу, яка, в свою чергу, залежить від якості зображення мікроскопа, параметрів передавальної трубки, характеристик електронної схеми посилення; забезпечувати лінійність рядкової розгортки.

Високоякісні телевізійні вимірювачі дозволяють досягти дуже високої точності: випадкова похибка вимірювань на рівні  $2\sigma$  складає близько 0,01 мкм. Можливо і подальше підвищення точності цих систем, наприклад, заміною

телевізійного приймача, що має деяку нелінійність розгортки по полю, на спеціальні твердотільні лінійні фотоелектричні перетворювачі відеосигналу.

Телевізійні вимірювачі дають можливість при різних збільшеннях об'єктів визначати лінійні розміри в широкому діапазоні від одиниць до сотень мікрон, причому за час одного кадру елемент може бути проконтрольований як по одному рядку телевізійної розгортки, так і по декількох рядках з усереднюванням результатів, що зменшує випадкову помилку вимірювань, а також дозволяє отримати дані про якість краю (рис.3.4), необхідні при проведенні та розробці різних технологічних процесів (прояві, травленні, запиленні).

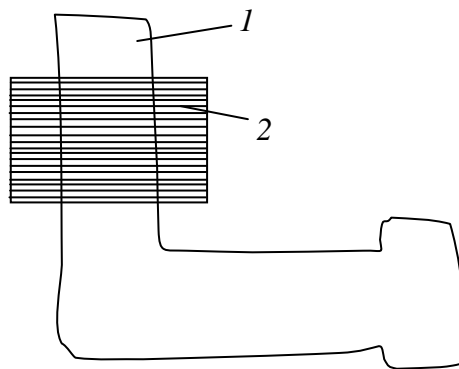


Рис. 3.4. Усереднення результатів вимірювань за декількома рядками телевізійної розгортки: 1 – зображення елементів, 2 – кадр растрів

Такі вимірювання необхідні в мікроелектроніці, оскільки зображення елементів можуть бути значно спотворені, а їх ізофоти мати таку складну і викривлену форму, що зняття відліку по будь-якому одному перетину не може бути назване його розміром.

Телевізійний метод дозволяє також легко здійснити вимірювання на декількох рівнях детектування  $U_{\phi}$ , тобто реєструвати декілька крапок на кривій розподілу інтенсивності краю зображення елементу, забезпечуючи можливість значного підвищення точності вимірювань.

Найбільшій точності фотоелектричних вимірювань можна досягти, реєструючи форму всієї кривої розподілу інтенсивності краю, що дозволяє з високою точністю, використовуючи обчислювальну техніку, вирішити зворотну задачу – задачу відновлення вимірювання об'єкту за його зображенням, коли всі параметри системи формування зображення відомі. З іншого боку, оскільки для практики часто не потрібна висока абсолютна, а потрібна висока відносна точність вимірювання на декількох рівнях

інтенсивності, можна підібрати рівень таким, щоб забезпечувалися оптимальні умови для проведення будь-якого технологічного процесу, наприклад експонування.

Іншим типом телевізійних вимірювальних систем є телевізійні мікроскопи із скануванням оптичним променем.

Можливі два способи отримання скануючого оптичного променя: за допомогою спеціальної електронно-променевої трубки з плямою, що біжить, і шляхом рядково-кадрової розгортки випромінювання від нерухомого джерела світла (наприклад, лазера).

На рис. 3.5 приведена принципова схема телевізійного мікроскопа з плямою, що біжить, контролюючого лінійні розміри елементів на фотошаблоні або ВС (у відбитому світлі) і їх взаємне розташування. Електронно-променева трубка з плямою, що біжить, здійснює відрядкове сканування об'єкту контролю 8 за допомогою мікроскопа, що працює в зворотному ході променів (3 – окуляр, 7 – об'єктив, 6 – дзеркало).

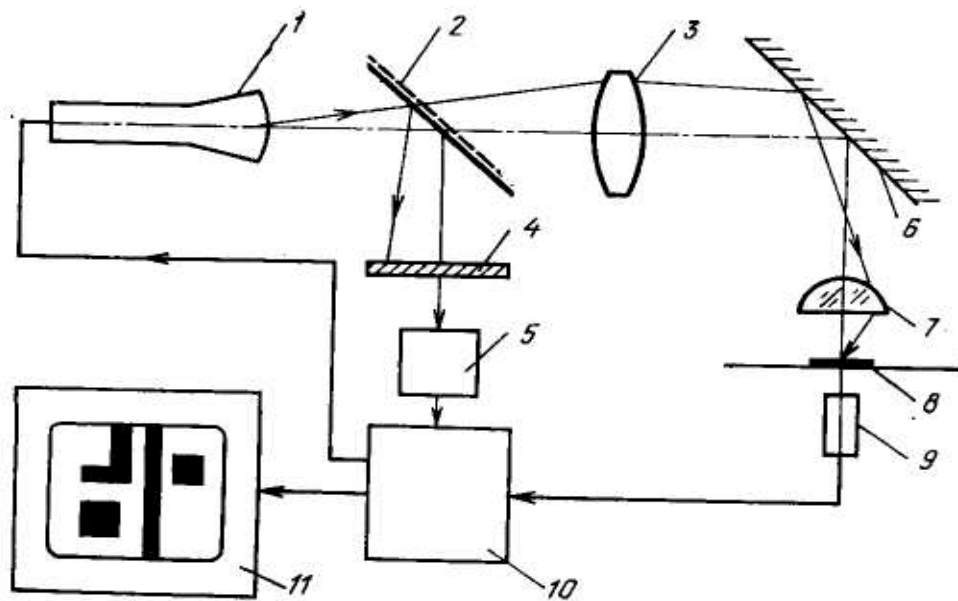


Рис. 3.5. Принципова схема телевізійного мікроскопа з плямою, що біжить

При цьому пляма, що біжить, на екрані електронно-променевої трубки (джерело світла) процюється із зменшенням, що дорівнює збільшенню мікроскопа  $V_u$  в площину об'єкту контролю 8.

Діаметр плями (розмір растру сканування), що біжить, за допомогою мікроскопа з відповідним збільшенням можна довести до 1 мкм, реалізуючи тим самим високий дозвіл системи. Світло від елементів об'єкту реєструється фотопомножувачем 9, вихідний сигнал з якого пропорційний кількості світла, що пройшло крізь об'єкт контролю або відбитого ним (фотопомножувачі як

приймачі світла має переваги перед телевізійними трубками, наприклад, мають лінійну світлову характеристику у великому діапазоні яскравості і нижчий рівень шумів).

Електронна система 10 керує формуванням зображення на екрані дисплея 11 і забезпечує синхронізацію розгортки на трубці плями, що біжить, 1 на екрані кінескопа 11.

Автоматичні вимірювання лінійних розмірів на мікроскопі з плямою, що біжить, з урахуванням необхідного порогу детектування можуть бути проведені аналогічно раніше описаному методу (див. рис. 3.3) рахунку імпульсів. При цьому не потрібне застосування рухомих частин (столу або дзеркал), що є гідністю методу.

Окрім вимірювання розмірів елементів на такому мікроскопі можна достатньо точно проконтролювати взаємне розташування окремих елементів мікрозображення на полі, рівному полю зображення мікрооб'єктиву (діаметр поля зображення таких мікрооб'єктивів при роздільній здатності приблизно 1 мкм зазвичай не перевершує  $2y' = 5-8$  мм).

Для забезпечення контролю взаємно розташування елементів або розмірів структур більшого розміру потрібно переміщати об'єкт 8. Вимірювання взаєморозташування об'єктів в межах поля зору мікрооб'єктиву може здійснюватися з високою точністю (близько 1 мкм), причому нелінійність розгортки трубки з плямою 1, що біжить, можна врахувати за допомогою оптико-електронної системи (2, 4, і 5). Частина пучка випромінювання відводиться напівпрозорим дзеркалом 2 на реперну координатну систему 4, таку, що грає роль еталонної шкали і калібруючи лінійну розгортку в площині збільшеного зображення, тобто з підвищеною в  $V_m$  разів точністю.

Окрім обліку не лінійності розгортки випромінюючої трубки, електронний блок 5 може також врахувати заздалегідь зміряну аберацію мікрооб'єктива (дисторсію, кривизну поля зображення) і внести відповідні поправки до результатів вимірювань залежно від положення вимірювального пучка в полі зображення.

### **§ 3.2. Пристрої контролю розмірів**

Найбільше розповсюдження отримали пристрої для контролю виробів, що протягуються та прокочуються. Існує низка методів такого контролю. На рис. 3.6,а показана схема контролю діаметра дроту [3.1].

Світловий потік джерела 1 розділюється діафрагмою 2 з двома прямокутними отворами на дві частини. На шляху однієї частини світлового потоку розташовується контролюємий дріт 3, що спирається на ролики 4. Матова пластинка 5 рівномірно розсіює світло обох частин потоку, щоб випромінювання катоду фотоелемента було рівномірним. Обидві частини потоку модулюються заслонкою 6, що коливається між здвинутими отворами діафрагми (тому потоки модулюються протифазно. Якщо потоки не рівні, то асинхронний двофазний двигун 7 обертає мікрометричний гвинт 8 та шторка 9

перекриває частину потоку, проти якого розташований дріт. Одночасно повертається шкала 10, що вказує діаметр дроту.

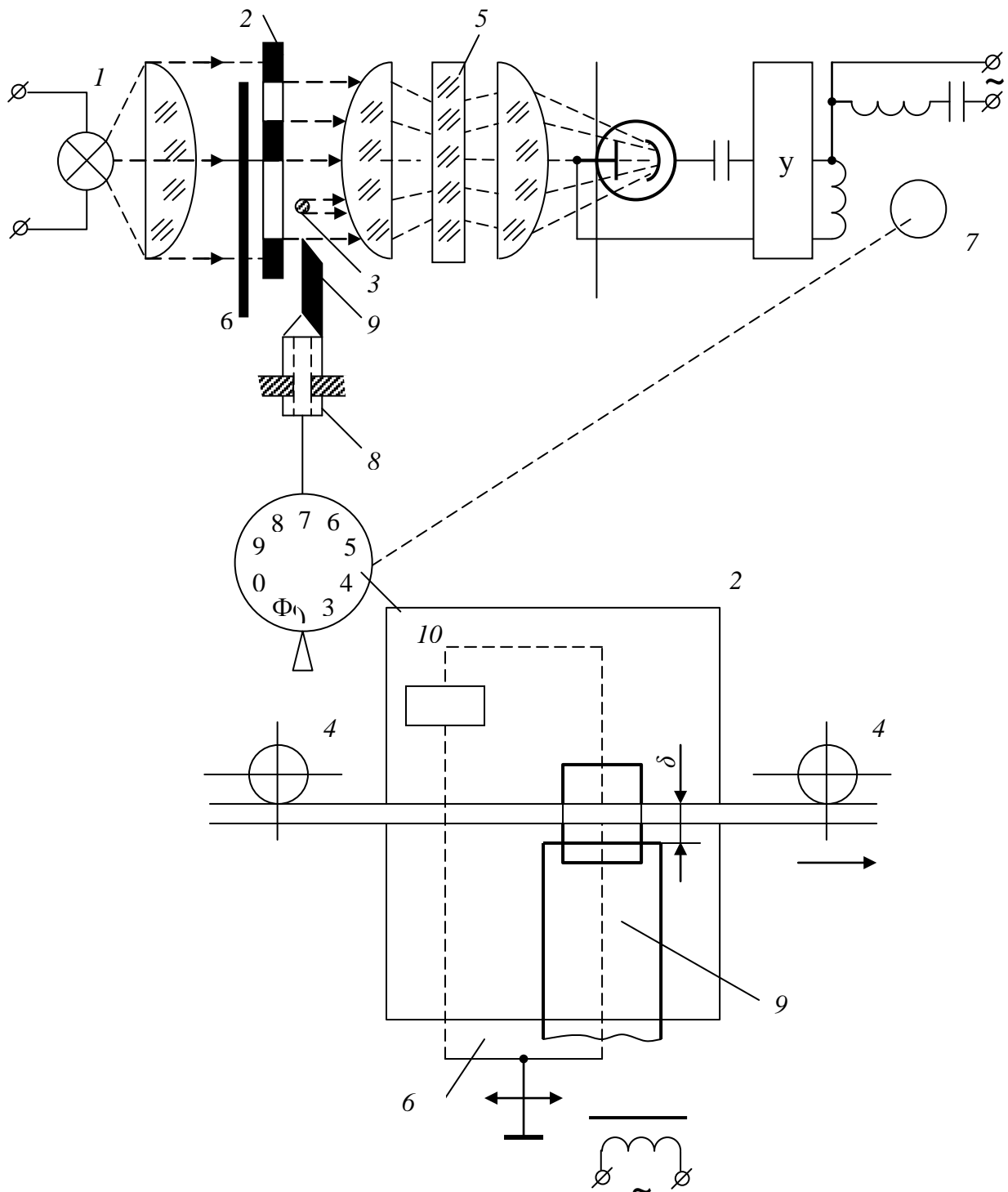


Рис. 3.6,а. Принципова схема для контролю діаметра дроту компенсаційним методом



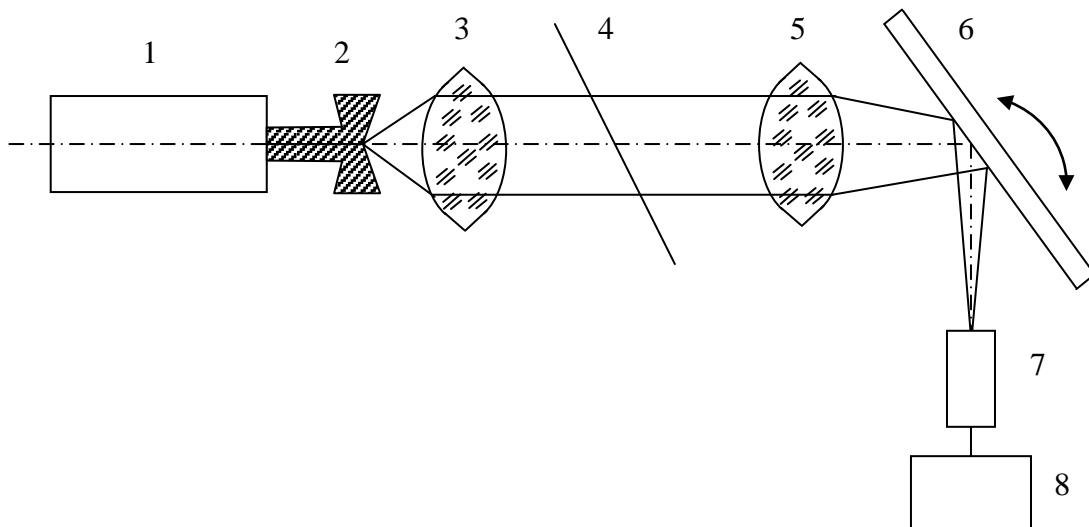


Рис. 3.6,б. Принципові схеми для контролю діаметра дроту безконтактним методом

Межа вимірювання діаметра дроту в цьому пристрої складає 0,1–3,5 мм. Похибка вимірювань при швидкості переміщення дроту 5 м/с не перевищує 0,005 мм.

Для безконтактного контролю діаметрів мікропроводів та волокон може бути застосована система, засади дії якої показаний на рис. 3.6,б. Вона базується на використанні дифракційної картини, що утворюється при попаданні випромінювання на об'єкт (мікродріт або волокно). Випромінювання газового лазера 1 через телескопічну систему, що складається з компонентів 2, 4 та слугує для збільшення діаметра пучка, попадає на вимірюємий мікродріт 4.

У фокальній площині лінзи 5 утворюється дифракційна картина. Її розташування буде залежати від повороту дзеркала 6, що обертається. На фотоприймач 7 випромінювання попадає через вузьку щілину. При повороті дзеркала 6 дифракційна картина переміщується по щілині фотоприймача та на його виході з'являється сигнал, що описує розподіл інтенсивності.

Оскільки дифракційна картина залежить від діаметра мікродроту, то при постійній швидкості повороту дзеркала 6 часова відстань між двома мінімумами в ній буде пропорційна діаметру мікродроту. Сигнал, що представляє собою два імпульси, відстань між котрими при переході від часового інтервалу до лінійного дорівнює діаметру, що вимірюється, фіксується реєструючим пристроєм 8. Це може бути осцилограф, з котрого відлік знімається візуально, або цифровий пристрій.

Прилад забезпечує високу точність, оскільки результат вимірювань в широких межах не залежить від зміни інтенсивності випромінювання лазера, розташування дроту в пучку, розподілу інтенсивності випромінювання в поперечному перерізі пучка.

### § 3.2.1. Лазерні прилади контролю розмірів

Лазерні прилади можна використовувати для безконтактних вимірів геометричних розмірів деталей після механічної обробки (зазор, довжина, ширина, товщина, висота, глибина, діаметр).

Такі прилади дозволяють здійснювати комплексні виміри:

- відхилення від вертикальності;
- величину площинності поверхні;
- точність профілів.

Існує можливість одержувати похідні величини, такі, як прогин й опуклість.

Промислові лазерні вимірювальні системи дозволяють проводити безконтактні вимірювання геометричних розмірів і форми сировини, заготовок, деталей і готової продукції в процесі виробництва безпосередньо на конвейері або у виробничій лінії з мікронною точністю (рис. 3.7).

Вимірювання проводиться безконтактно, за допомогою цифрових лазерних мікрометрів, встановлених відповідно до умов базування об'єкту і схеми вимірювань.

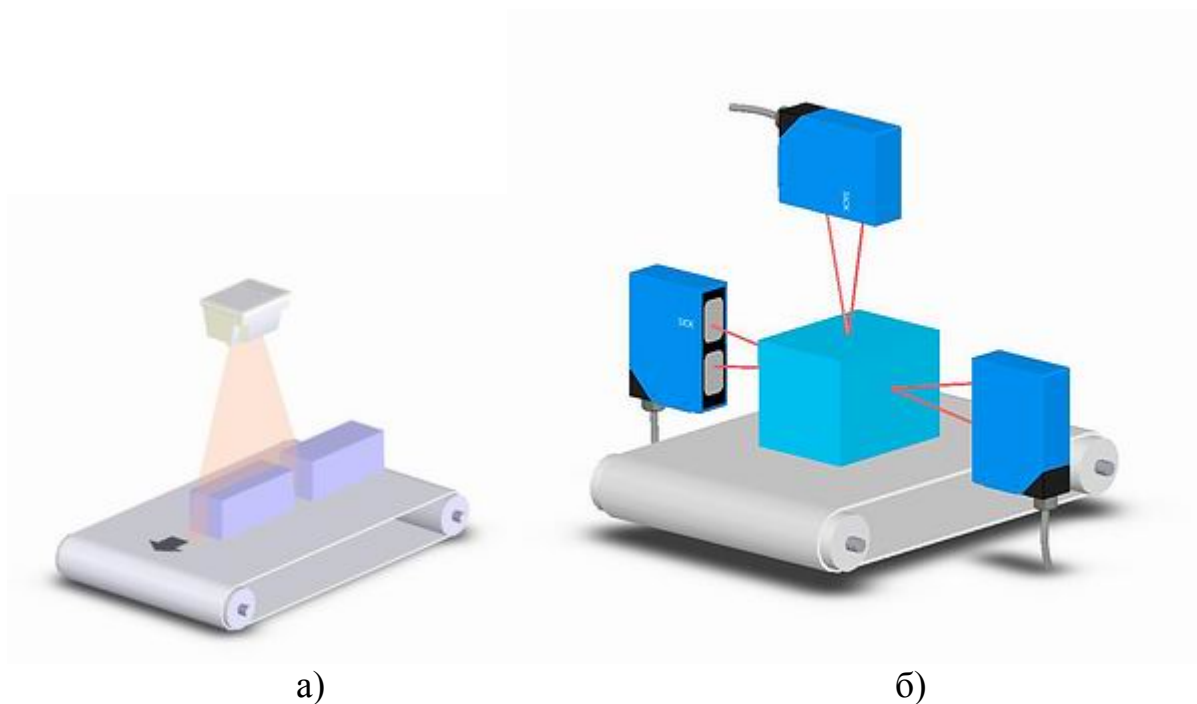


Рис. 3.7. Загальні схеми застосування лазерних вимірювальних приладів у промисловому контролі деталей при механічній обробці

Для прецизійних вимірювань застосовуються лазерні мікрометри, що забезпечують субмікронну точність при використанні високоточних лінз.

Програмне забезпечення виконує обробку отриманих даних, зокрема: калібрування, перехід до реального масштабу координат, прив'язку системи координат до об'єкту, вимірювання геометричних параметрів, об'єднання показників декількох чутників для отримання цілісної інформації, перевірку результату вимірювань на відповідність різним критеріям (знаходження розмірів в полі допуску, придатність або непридатність виробу, відношення до конкретного класу виробів).

Переваги застосування подібних лазерних оптико-електронних приладів (рис. 3.71,а) полягають у наступному: забезпечується 100% контроль розмірів кожної одиниці продукції з мікронною точністю, виключається «людський чинник», контроль розмірів в реальному масштабі часу дозволяє своєчасно внести коригування до технологічного процесу і виключити брак, виключно висока точність вимірювань (до субмікронної похибки), висока повторюваність вимірювань, універсальність, незалежність від поверхні і кута нахилу, інтеграція в існуючі виробничі лінії, АСК ТП і MES. Окрім того, можлива інтеграція лазерних вимірювачів з приводами і системами керування рушіями верстатів тощо, внаслідок чого здійснюється зворотній зв'язок з об'єктом технологічного процесу.

Вимірювання (рис. 3.7,б) проводиться безконтактно, за допомогою цифрових лазерних чутників, встановлених відповідно до умов базування об'єкту і схеми вимірювань. Широкий вибір моделей чутників забезпечує необхідну точність на різних діапазонах вимірювань.

Програмне забезпечення забезпечує обробку сигналу, зокрема: калібрування, перехід до реального масштабу координат, прив'язку системи координат до об'єкту, вимірювання і розрахунок геометричних параметрів, об'єднання показників декількох чутників для отримання цілісної інформації, перевірку результату вимірювань на знаходження розмірів в полі допуску, відношення до конкретного класу виробів (у завданнях сортування).

Подібні прилади мають додаткові можливості, що полягають у наступному: можлива інтеграція лазерних вимірювачів з приводами і системами управління рухом, лазерні вимірювальні пристрої можуть встановлюватися безпосередньо на обробне устаткування з метою контролю положення робочого органу або активного контролю якості, існують моделі для екстремальних навколишніх умов (наприклад, висока температура об'єкту в металургії), а також різне захисне приладдя (наприклад, системи охолодження або кожух із захистом від вибуху).

Прилади за подібними прикладами схем можуть бути використаними для:

- Вимірювання діаметру і контроль овальності деталей,
- Вимірювання довжини деталі,
- Вимірювання габаритних розмірів деталей,
- Контроль параметрів різьби тощо.

Сучасні промислові лазерні чутники дозволяють проводити безконтактні вимірювання об'ємів сировини, матеріалів і заготовок, в процесі виробництва в реальному часі безпосередньо на рухомій стрічці конвейєра.

Так, (рис. 3.8) вимірювання проводиться безконтактно, за допомогою скануючих 3D-відеокамер або цифрових лазерних вимірювачів, що забезпечують знімання координат профілю об'єкту або відстані до нього. Сканування профілів об'єкту проводиться з високою швидкістю і синхронізоване із швидкістю конвейєра. Розрахунок об'єму в реальному часі забезпечує програмна частина системи.

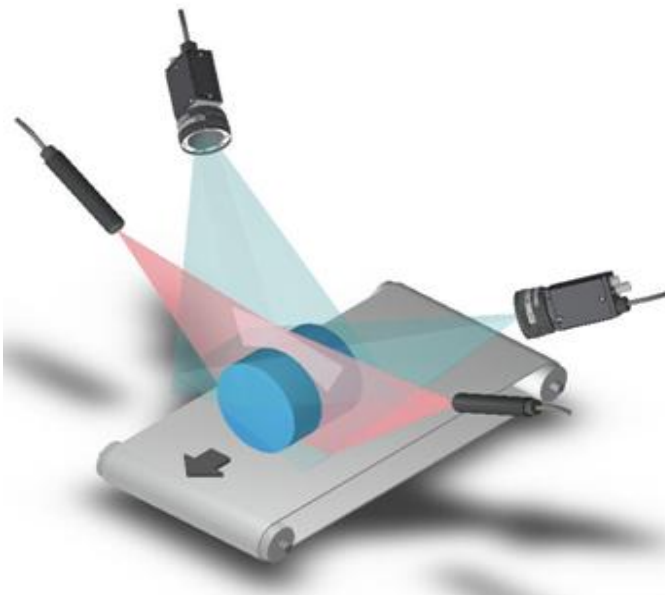


Рис. 3.8. Вимірювання геометричних розмірів деталі за допомогою цифрових 3D-лазерних вимірювачів

Програмне забезпечення, яке забезпечує функціонування таких оптико-електронних приладів у виробничих автоматизованих системах механічної обробки металів, виконує обробку отриманих даних, зокрема: калібрування, перехід до реального масштабу координат, вимірювання геометричних параметрів деталі, поєднання показників декількох відчутників для отримання цілісної інформації про хід технологічного процесу виготовлення деталі, проведення необхідних розрахунків з урахуванням швидкості руху конвейєра, перевірку результатів на відповідність таким критеріям, як знаходження розмірів деталі в полі допуску, придатність або непридатність контрольної деталі, відношення до конкретного класу виробів (у завданнях сортування).

Застосування таких оптико-електронних приладів забезпечує автоматизований контроль і облік об'єму матеріалів або виробів, що конче потрібне у сучасних умовах роботи приладобудівного підприємства.

Контроль геометричних розмірів деталі у реальному масштабі часу дозволяє своєчасно внести коригування до технологічного процесу механічної обробки, тобто виключити брак, запобігти порушенням технологічного процесу, виникненню нештатних ситуацій при виготовленні деталей. При цьому забезпечена висока швидкість і точність вимірювань. Ці прилади також

дозволяють можливість інтеграції в виробниче автоматизоване технологічне обладнання, тобто інтеграції лазерних вимірювачів з рушіями верстатів і системами керування рухом для створення замкненого циклу механічної обробки надточних деталей.

Лазерний чутник OMRON (рис. 3.9). Основним призначенням лазерного чутника Z4LBV2 є точне вимірювання розмірів об'єкту. Мінімальний розмір вимірюваного об'єкту  $D=0,1$  мм. Дистанція спрацьовування від 0 до 300 мм. Робоча температура складає  $-10...+50^{\circ}\text{C}$ . Функції цього чутника дозволяють вимірювати діаметр отворів, настраювати рівень відліку, визначати точне положення об'єкту, його розміри в будь-якій позиції. Чутник дозволяє встановлювати різні режими вихідного сигналу (HIGH/LOW/PASS/NG) або аналоговий вихід. Застосоване лазерне випромінювання у видимому діапазоні, ширина лазерного випромінювання 10 або 30 мм. Прилад має п'ятирозрядний цифровий дисплей, аналоговий вихід і два транзисторних виходи.



Рис. 3.9. Загальний вигляд оптико-електронного чутника для вимірювання геометричних розмірів деталі при механічній обробці

Лазерні мікрометри РФ651 призначені для безконтактного вимірювання і контролю розташування, розмірів (діаметр, товщина, ширина, зазори) технологічних об'єктів. Принцип роботи оптико-електронного приладу побудований на тіньовому методі. Мікрометр складається з двох модулів: випромінювача і приймача випромінювання, що формується оптичною системою. Тіньове зображення об'єкту телескопічною системою приймача формується на поверхні ПЗЗ-лінійки. Процесор сигналів розраховує розмір об'єкту за розміром зображення.



OD Max- OMRON (рис. 3.10) є високоточною системою для вимірювання відстані, що складається з однієї або двох сенсорних головок і підсилювача. Перевагами приладу є точність вимірювання, що не залежить від яскравості об'єкту, величина до 0,01 мм, наявність 4 аналогових виходів і 5 цифрових виходів, RS 232C інтерфейс.

Рис. 3.10. Лазерний вимірювач серії OD / OD Hi / OD Max OMRON

Вимірювання розмірів здійснюється у декількох діапазонах: від 25 до 35; від 65 до 105; від 250 до 450 мм; крок 150 мкм. Як джерело світлового випромінювання застосовано діодний лазер з довжиною хвилі 0,65 мкм. Час відгуку: 0,5 мс.

Цей прилад доцільно застосовувати у технологічному обладнанні при механічній обробці деталей.

Також для вимірювання довжин і відстаней на технологічному механообробному обладнанні можливе використання лазерних далекомірів. Ці оптико-електронні прилади дозволяють з високою точністю (до 1,5 мм) проводити габаритні вимірювання об'єктів.

Принцип роботи лазерного далекоміра полягає в тому, що посилені приладом імпульси відбиваються від цілі. Потім вбудований мікропроцесор обчислює відстань залежно від часу з моменту посила імпульсу до моменту прийому його віддзеркалення. Лазери, які встановлені в далекомірах, працюють в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль. Здатність електромагнітного випромінювання розповсюджуватися з постійною швидкістю дає можливість визначати дальність до об'єкту. Так, при імпульсному методі використовується наступне співвідношення:  $L = ct/2$ , де  $L$  - відстань до об'єкта,  $c$  - швидкість розповсюдження випромінювання,  $t$  - час проходження імпульсу до цілі і назад.

Суть імпульсного методу полягає в тому, що до об'єкта посиляють зондуєчий імпульс, він же запускає часовий лічильник у далекомірі. Коли відображений об'єктом імпульс приходить до далекоміра, то він зупиняє роботу лічильника. За величиною часового інтервала затримки відбитого імпульсу) визначається відстань до об'єкту.

При фазовому методі лазерне випромінювання модулюється по синусоїдальному закону за допомогою модулятора (електрооптичного кристала, що змінює свої параметри під впливом електричного сигналу). Зазвичай використовують синусоїдальний сигнал з частотою від 10 до 150 МГц (вимірювальна частота). Відображене випромінювання потрапляє в приймальну оптику і фотоприймач, де виділяється модулюючий сигнал. Залежно від дальності до об'єкту змінюється фаза відображеного сигналу щодо фази сигналу в модуляторі. Вимірюючи різницю фаз, визначають відстань до об'єкту.

Більшість сучасних лазерних далекомірів мають широкий набір додаткових функцій. Найбільш частими є обчислення площі або об'єму об'єкту.

Лазерні рулетки (рис. 3.11, табл. 3.1), що поставляються сьогодні на ринок, є досить компактними приладами.



Рис. 3.11. Зовнішній вигляд лазерного далекоміра (рулетки) LEICA DISTO A2

Вони здебільшого мають протиударний, пило- та вологозахищений корпус, завдяки чому підходять для роботи в будь-яких умовах, тобто можуть використовуватись у виробничих цехових умовах. Найбільшими світовими виробниками лазерних далекомірів-рулеток є компанії Stabila, Leica DISTO, Robotoolz, Stanley, Bosch, Dimetix, Bushnell, Newcon.

Табл. 3.1. Технічні характеристики лазерного далекоміра (рулетки) LEICA DISTO A2

Параметр	Величина
Максимальна похибка вимірювання, мм	$\pm 1,5$
Дальність вимірювань, м	від 0.05 до 60
Діапазон зйомки без відбивача, м	60
Час вимірювання, с	від 0.5 до 4
Діаметр лазерної плями, мм/ на відстані, м	8 мм / 10 м 25 мм / 50 м

Прилад призначений для вимірювання площ, об'ємів, обчислення довжин недоступних ділянок поверхні деталі. У засади роботи покладено розрахунки згідно теореми Піфагора.

Прилад здійснює вимірювання в безперервному режимі. Конструкція передбачає можливість установлення на штатив. У корпус вбудований оптичний візор та рівень, що розширює функціональні можливості приладу.

Перспективним є застосування у даному випадку лазерного випромінювання призначене для відтворення ліній, відтворення функції упору або шаблону, покажчика лінії згину або розрізу, позиціювання місць встановлення різних конструкцій при складанні; покажчика позицій при свердленні отворів перетинання ліній (позначення центрів, інших реперних крапок, баз тощо), проектування контурів або 2-х або 3-х мірне зображення (проектори). Відповідно до призначення LAP монтує лазерні діодні випромінювачі у прилади з корпусами різної форми, величини й класу захисту.

Лазерні прилади для вимірювання лінійних розмірів забезпечують наступні основні характеристики:

- довжина лінії до 20 метрів;
- клас захисту корпусу від 42 до 65;
- робоча напруга 5 В, 24В, 230 В;
- потужність від 1 до 30 мВт;
- корпусу з рухливим лазером;
- кріплення для лазерів;

Значний клас оптико-електронних приладів для контролю якості точної продукції після механічної обробки являють проектори, що використовують в якості джерела випромінювання лазери.

Лазерні проектори зображують контури, форми або позиції в пропорції 1:1 на різних поверхнях. Використання лазерів полегшує позиціювати

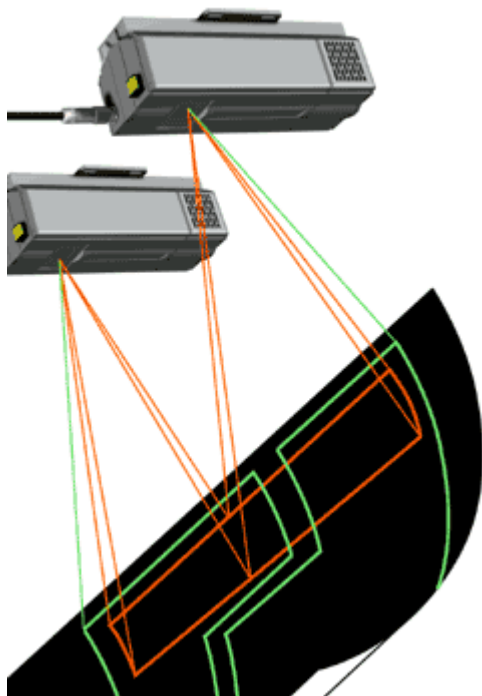


заготовку, мінімізувати кількість відходів, точно монтувати складні конструкційні елементи деталей. Якщо необхідно, то кілька проекторів можуть бути об'єднані для демонстрації більших зображень або розмноження невеликих зразків на певній області.

Система працює з 2-х й 3-х мірними файлами стандартних CAD-програм, сумісна з металообробними верстатами, що мають числове програмне керування ( у т.ч. графічні файли HPGL).

Лазерні проектори забезпечують наступні основні характеристики:

- лазерні проектори для одержання контуру з CAD-системи;
- зображення будь-яких геометричних форм;
- маса приладу 3 кг;
- габарити 300 x 110 x 110 мм;



Проектори серії CAD-Pro (рис. 3.16, табл. 3.12) можуть проектувати зображення одночасно з використанням кольорів (червоний, зелений і жовтий).

Для простоти використання проектори можуть бути настроєні вручну. Це дозволяє використати проектор без комп'ютера. Проектори не вимагають профілактичних робіт і передбачені для використання в промислових умовах.

Рис. 3.12. Загальна схема вимірювань за допомогою лазерних проекторів

Отже, взагалі лазерна вимірювальна техніка має наступні основні характеристики та призначення:

- лазерні чутники для виміру геометричних розмірів: зазор, довжина, ширина, товщина, висота, глибина, діаметр;
- чутники для виміру розмірів від 10 до 4000 мм;
- лазери для виміру діаметрів окружностей від 0,02 до 2000 мм;
- прилади для виміру товщини, вертикальності, площинності й відхилень.

У процесі механічної обробки металів важливою характеристикою є формотворення деталей, тобто контроль відхилення від заданої форми повинен проводитись у промислових умовах дуже ретельно. Тому прилади контролю відхилень від форми деталі необхідні для забезпечення підвищення продуктивності виробництва (рис. 3.13, 3.14, табл. 3.3).



Табл. 3.2. Технічні характеристики застосованих лазерних вимірювачів розмірів

Характеристики	Тип пристрою							
	LD Серія	HD Серія	RD Серія	RY Серія	UD Серія	Ультра	2D/3D Проектор	Серво- лазер
Довжина хвилі випромінювання, мкм	0,65	0,65	0,65	0,53	0,65	0,65	0,53	0,65
Розміри, мм								
Довжина	дуже малий	малий	середній	середній	дуже малий	малий	малий	великий
Діаметр	90	140	210	400	90	125	300	від 920
Ширина	19	25	55	55	25	30	110	180
Висота						81	110	130
Потужність, мВт	1-15	1-30	1-30	10, 20	н.с.*	н.с.*	5	1-15
Довжина лінії, м	1-11	1-20	1-25	20, 30	1-11	3-20	n.a.	1-5
Застосування + найбільш застосований o можливий - менш застосований								
Механічна обробка	-	+	+	+	-	+	+	o
Металургія	o	+	+	o	+	o	+	-

Прилад для вимірів відхилень форми Roundtest RA-1500 (рис. 3.13, табл. 3.3) є компактною настільною моделлю для вимірів відхилень від циліндричності деталі.

Цьому приладу притаманні нескладне ручне центрування й вирівнювання деталі, висока точність вимірів. Має планшайбу на повітряних опорах. Надає

практично ідеальні  
результати при вимозі  
високої точності обробки  
деталі.



Рис. 3.13. Прилад для вимірів відхилень форми Roundtest RA-1500

Прилад для вимірів відхилень форми Roundtest RA-2000 (рис. 3.14, табл. 3.3) є універсальною настільною моделлю.

RA-2000 DS й RA-2000 DH:

- Швидке просте й точне ручне регулювання положення деталі (Стіл із цифровим регулюванням, DAT). Сама зроблена технологія для самих вимогливих клієнтів.

RA-2000 AS й RA-2000 AH:

- Швидке просте і точне автоматичне регулювання положення деталі.



Рис. 3.14. Прилад для вимірів відхилень форми Roundtest RA-2000

Табл. 3.3. Технічні характеристики вимірювачів розмірів відхилень форми деталей

Параметр	Тип приладу	
	Roundtest RA-1500	Roundtest RA-2000
Діапазон центрування, мм	$\pm 3$	$\pm 3$
Діапазон вирівнювання:	$\pm 1^\circ$	$\pm 1^\circ$
Макс. вимірюваний діаметр, мм	100	100
Кути установлення вимірювального чутника	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
Діапазон вимірів	$\pm 400$ мм	$\pm 400$ мм
Вимірювана висота, мм	зовніш./внутр: 150	280 (DS/AS) або 480 (DH/AH)
Діапазон зсуву по осі R, мм	75	175
Макс. вимірювана глибина, мм	90	100
Точність обертання, мкм	$(0,2+6H/10000)$	$(0,2+6H/10000)$
Точність напрямних, мм	(відхилення від прямолінійності по осі Z): 0,15/50; 0,3/150	0,3/150

Дистанційне безконтактне вимірювання відстані до поверхні різних матеріалів. Призначений для роботи з IBM-сумісними промисловими й ін. ЕОМ. Оцифрований сигнал лазерного приладу ТД-46 (рис. 3.15, табл. 3.4) по інтерфейсі RS-232C передається на зовнішню ЕОМ для наступної обробки й обчислення відстані до об'єкта.



Рис. 3.15. Лазерний контрольно-вимірювальний прилад ТД-46

Табл. 3.4. Технічні характеристики приладу ТД-46

Середня відстань до об'єкта, мм	330
Температура об'єкта	до 1200°C
Точність виміру	10 мкм
Діапазон вимірюваних відхилень	100 мм
Частота проведення вимірів	до 10 Гц
Мінімальний час реєстрації	2 мс
Кількість елементів фотоприйомної матриці	1024
Кут виміру	26.8°
Робочий інтервал температур	0-45°C
Температурний дрейф нуля	3*10-3 мм/град
Інтерфейс	RS-232 або LPT
Електроживлення	на вимогу споживача
Споживана потужність	10 Вт
Вага приладу	2 кг
Габарити	250x170x50 мм
Поле зору (на відстані 4,5 м)	830 мм

Для передачі результатів вимірювання використаний інтерфейс RS-232C. Можливі варіанти конструкції приладу ТД-46 з LPT інтерфейсом. На корпусі ТД-46 розташовані: роз'єм живлення від мережі, мережовий запобіжник, світлодіод - індикатор мережі, роз'єм інтерфейсу.

Тріангуляційний чутник ТД-46 має спеціальне програмне забезпечення, що забезпечує обробку сигналу, відображення результатів виміру й видачу обмірюваних даних споживачеві.

На рис. 3.16 наведений пристрій для сканування метрологічних характеристик об'єкту, наприклад параметрів твердого тіла обертання. Дія пристрою може бути заснована або на тіньовому, або на лазерному дифракційному методі геометричних вимірювань.



Рис. 3.16. Пристрій для вимірювання геометричних параметрів твердого тіла обертання

Використовуючи тіньовий метод, об'єкт вимірювання розміщується між джерелом світла (наприклад, лампа) і відеокамерою. Результати вимірювання об'єкту визначаються як різниця між тіньовими контурами об'єкту. Цей метод - простий у виконанні і настройці, недорогий і самий надійний, але має дуже невелику точність, яка визначається характеристиками відеокамери і звичайно складає 8-25 мкм для поширених індустріальних камер.

### § 3.2.2. Лазерні дифракційні вимірювачі розмірів

У загальному випадку лазерний дифракційний вимірювач складається з функціональних вузлів, представлених на рис. 3.17.

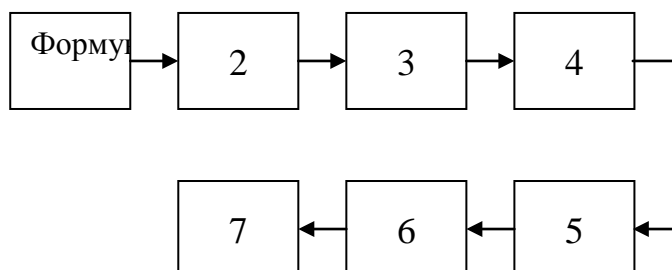


Рис. 3.17. Схема дифракційного вимірювача розмірів: 1-лазер; 2- формувач пучка; 3- об'єкт вимірювання ; 4 -об'єктив; 5 - перетворювач оптичного сигналу в електричний; 6 — блок обробки електричного сигналу; 7 — пристрій індикації

Як джерело випромінювання найбільш часто застосовують He-Ne – лазери ( $\lambda = 0,63$  мкм), що мають високу когерентність. Формувач пучка 2 використовується для одержання заданої форми і розміру поперечного перерізу пучка випромінювання лазера. Звичайно він являє собою телескоп Галілея або Кеплера, але іноді може мати більш складну оптичну схему.

Формувач дифракційного зображення 4 являє собою об'єктив, що призначений для одержання дифракційного відображення, що відповідає далекій зоні. Об'єкт виміру 3 звичайно розташовують перед об'єктивом, тому що тоді дифракційний розподіл інтенсивності у фокальній площині інваріантно щодо зсувів виробу. При необхідності здійснити вимір у широкому діапазоні змін розмірів потрібно мати набір змінних об'єктів з різною фокусною відстанню, щоб забезпечити необхідний розмір дифракційної картини в площині реєстрації.

Без набору об'єктів можна обійтися, розташовуючи вимірюваний виріб у лазерному пучку, що сходиться, за об'єктивом. При цьому розмір дифракційної картини у фокальній площині залежить від відстані виробу до об'єкта і змінюється з його зміною по лінійному закону.

Отже, якщо переміщати об'єкт виміру уздовж осі лазерного променя і приводити розмір дифракційної картини до визначеного (еталонного) розміру, можна за величиною переміщення об'єкта судити про його розмір. Проте при цьому значно зменшуються припустимі переміщення об'єкта в процесі вимірювання і швидкодія вимірювача.

Перетворювач оптичного сигналу в електричний 5 для вимірювачів, що використовують вимір характеристичних розмірів дифракційного зображення, звичайно містить у собі систему сканування дифракційного розподілу і фотоелектричні чутники. Система сканування може бути механічною або електронною. Як механічні засоби застосовуються обертове дзеркало або призма, фасонний диск із прорізами, що обертається циліндр із прорізами тощо. Електронне сканування може здійснюватися видиконом та лінійним рядом послідовно опитуваних фоточутників.

Для вимірювачів, що використовують реєстрацію інтенсивності дифракційного зображення у фіксованих крапках, система сканування відсутній і використовуються тільки фотоелектричні чутники (рис. 3.18). Блок обробки електричного сигналу 6 призначений для виділення корисної інформації з електричного сигналу, що надійшов із блоку 5, і перетворення її у форму, зручну для виміру. Блоки 5 і 6 залежно від виконання визначають основні характеристики і відмітні ознаки вимірювальних пристроїв.

У промисловому варіанті приладу як фотоелектричний чутник використовується позиційно-чутливий елемент (рис. 3.19), що являє собою фотоелемент, розділений на двох частин, включені так, що при їхньому симетричному положенні щодо дифракційного максимуму вихідний сигнал дорівнює нулеві. При зміні діаметра виробу, який контролюють, дифракційний максимум рухається через стаціонарно установлений фотоелемент, викликаючи появу електричного сигналу, що відповідає зміні діаметра. При цьому

контрольований дріт може проходити горизонтально, вертикально і під будь-яким кутом.

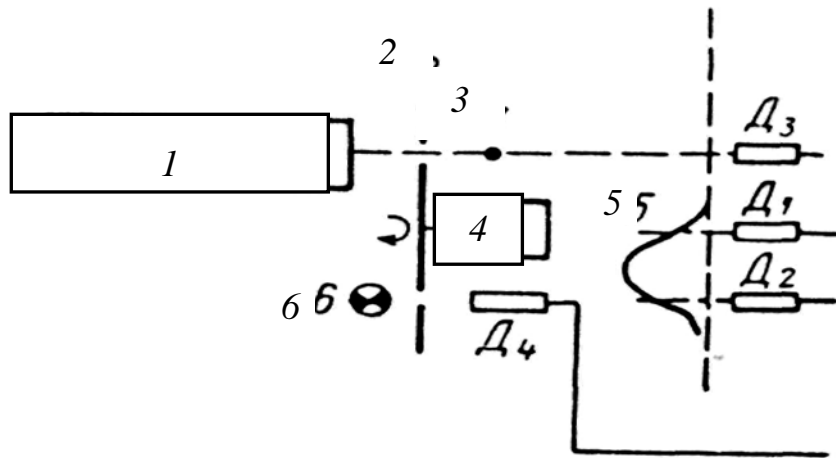


Рис. 3.18. Схема дифракційного вимірювача, заснованого на реєстрації інтенсивності: 1 — лазер; 2 -модулятор; 3 — вимірюваний дріт; 4 — мотор; 5 — дифракційний максимум; 6 — лампа опорного каналу; Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>, Д<sub>3</sub>, Д<sub>4</sub> — фотодетектори

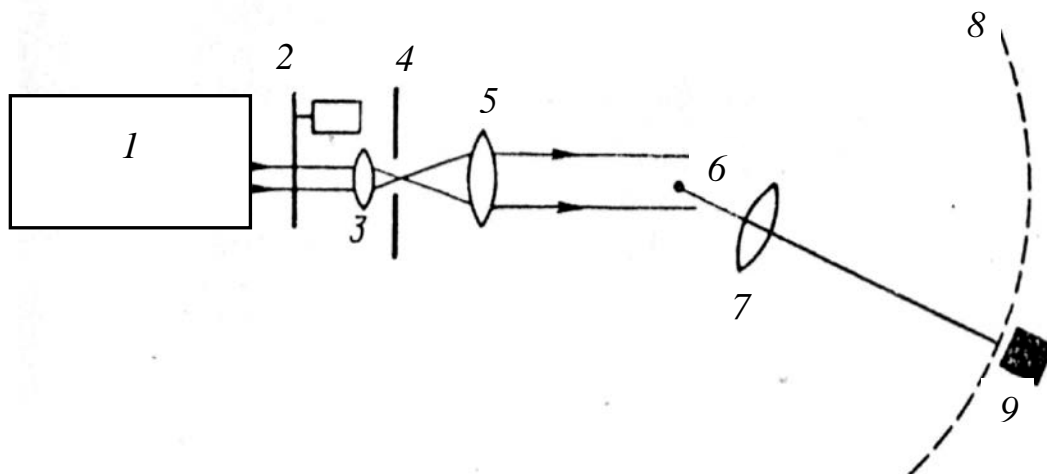


Рис. 3.19. Схема виміру з використанням позиційно-чутливого елемента: 1 — лазер; 2 — модулятор; 3, 5, 7 —об'єкти; 4 — діафрагма; 6 — об'єкт виміру; 8 —розподіл, що реєструється; 9 — позиційно-чутливий елемент

На центральній круговій шкалі встановлюється величина контрольованого діаметра. Якщо діаметр контролюємого дроту не відрізняється від номінального, стрілка приладу, що реєструє, знаходиться на нулі. Відхилення діаметра від номінальної величини відраховується по шкалі з

межами  $\pm 5\%$ . Діапазон вимірюваних діаметрів 5—160 мкм при похибці виміру 1%.

Найбільший практичний інтерес являють пристрої, що використовують попереднє перетворення дифракційного розподілу в електричний сигнал з наступним його автоматичним аналізом і виділенням інформації про відстань між екстремальними крапками дифракційного розподілу.

Такі пристрої дозволяють підвищити точність, швидкодія й автоматизувати процес виміру. Варто помітити, що через багатоступінчасте перетворення сигналу в таких пристроях не завжди вдається з достатньою точністю розрахунковим шляхом зв'язати абсолютне значення вимірюваного розміру з показниками закінченого приладу, що реєструє, і такі вимірювачі зазвичай мають потребу в попередньому калібруванні.

Оскільки дифракційний розподіл інтенсивності від отворів має вигляд, аналогічний дифракційному розподілові від дроту або щілини, описані прилади можуть використовуватися для контролю їхнього діаметра і форми. Однак освітленість дифракційних максимумів при цьому буде значно нижче. Для збільшення їхньої освітленості доцільно збільшувати за допомогою оптики щільність лазерного випромінювання в області отвору, а також використовувати більш потужні лазери. Крім того, виникає необхідність забезпечення лінійного сканування дифракційних **кілець** через їхній центр, для чого використовують замість щілинної діафрагми перед фотоприймачем крапкову діафрагму або видикон.

У низці випадків, що широко зустрічаються на практиці, удається використовувати результати, одержувані за допомогою геометричної оптики, тому що часто розміри об'єкта значно перевищують довжину хвилі. Причому ці результати досить точно описують поле розсіювання за умови, що зрушення фази  $\delta = 2\pi D (n - 1)/\lambda$  є досить великий, і кут розсіювання  $\varphi$  не занадто малий:  $\varphi \gg \frac{\pi D}{\lambda^{-1/3}}$ .

При розгляді полю чи розсіяного випромінювання навколо волокна варто брати до уваги дифрагованих, відбиті і переломлені промені і їхня взаємна інтерференція.

Різні типи переломлених променів (рис. 3.20) (0, 1, 2, 3 — номери  $\xi$  променів), а кутові зони розподілу різних компонентів розсіяного випромінювання (рис. 3.20,б). Унаслідок циліндричної симетрії полю чи розсіювання досить розглянути кутову зону в межах від 0 до  $180^\circ$ . При цьому можна установити наступне.

1. Дифрагованих поле займає кутову зону  $\varphi_4$  від 0 до  $90^\circ$ .
2. Випромінювання, відбите від бокової поверхні волокна ( $\xi = 0$ ), займає кутову зону  $0^\circ < \varphi_0 < 180^\circ$ , за винятком області геометричної тіні.
3. Випромінювання, що перетерпіло дворазове переломлення ( $\xi = 1$ ), займає кутову зону

$$0 \leq \varphi \leq 2 \arccos\left(\frac{1}{n}\right)$$

**4.** Випромінювання, що перетерпіло дворазове переломлення й однократне відображення від внутрішньої поверхні волокна ( $\xi = 2$ ), займає кутову зону

$$180^\circ - 4 \arcsin \sqrt{(4-n)/(3n^2)} + 2 \arcsin \sqrt{(4-n^2)/3} \leq \varphi_2 \leq -4 \arcsin(1/n)$$

і викликає появу головної веселки і її додаткових дуг.

Мінімальний кут  $\varphi_2$  визначає кутове положення головної веселки.

Для  $n > 4\pi^{-1}$  максимальний кут розсіювання більше  $180^\circ$ , що необхідно враховувати при розгляді інтерференційних ефектів у цій зоні.

**5.** Випромінювання, що перетерпіло дворазове переломлення двократне відображення від внутрішньої поверхні волокна ( $\xi = 3$ ) займає кутову зону.

$$0 \leq \varphi_3 \leq 6 \arcsin \sqrt{(9-n^2)/(8n^2)} - 2 \arcsin \sqrt{(9-n^2)/8}.$$

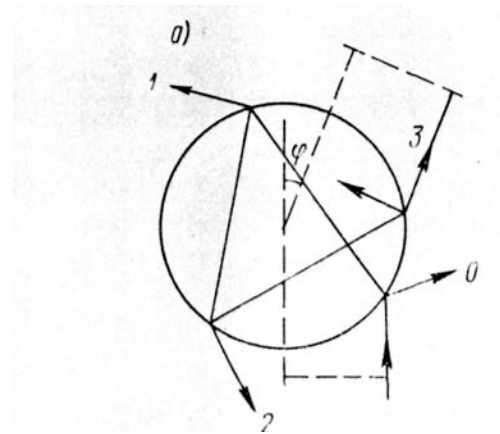
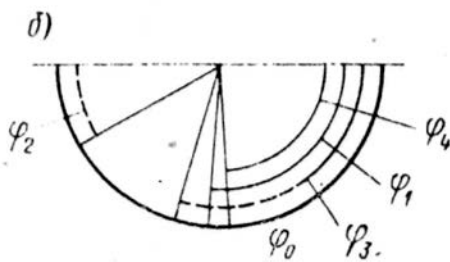


Рис. 3.20. Різні типи променів, переломлених циліндричним волокном (а), і кутові зони розподілу різних компонент розсіяного випромінювання (б)

Слід зазначити, що серед багатьох переваг, що властиві вимірюванням за допомогою дифракційних вимірювачів як геометричних так і фізичних параметрів отворів та інших розмірів необхідно звернути увагу на деякі недоліки, властивим вимірам параметрів що мають місце як для прозорих волокон так і непрозорих. Для прозорих волокон є характерним вплив набагато більшого числа чинників на результат вимірювань, чим при вимірюванні розмірів непрозорого об'єкта.



Якщо в першому випадку на результат вимірювань впливають властивості матеріалу волокна, його форма, орієнтація нециліндричного волокна щодо лазерного пучка, то в другому — лише проекція розміру на напрямок, перпендикулярний лазерному джуту. Тому доцільно по можливості зводити вимірювання прозорих об'єктів до вимірів непрозорих при використанні описаних вище методів вимірювання. Розглянуті способи і прилади для виміру геометричних параметрів дротів і волокон дозволяють також вимірювати значення показника переломлення матеріалу волокна, якщо відомо його діаметр.

Лазерні дифракційні вимірювачі можуть широко використовуватися як вимірювачі діаметра та форми отвору, поперечного переріза тонких дротів і волокон, так і як високочутливі чутники в автоматичних системах керування технологічними процесами.

Сфера застосування дифракційних вимірювачів значно ширше, ніж використання їх тільки для виміру розмірів. Вони можуть бути застосовані для точного визначення деформацій, внутрішніх напружень, вібрацій, биттів роторів і валів, малих зсувів тощо, тобто практично у всіх випадках, де можна звести зміну потрібних параметрів до зміни розмірів об'єктів, наприклад щілини, на якій спостерігають дифракцію.

На основі описаних лазерних дифракційних вимірювачів можуть бути розроблені прилади для механічних випробувань (визначення коефіцієнта пружності, розривного зусилля тощо), а також для визначення оптичних, теплофізичних і інших властивостей волокон, вимір яких безпосередньо у волокні іншими методами не є можливим.

Лазерний дифракційний метод заснований на освітленні об'єкту вимірювання лазерним випромінюванням, реєстрації світлових полів на виході оптичної системи та аналізі отриманої дифракційної картини. Схематична структура системи вимірювання показана на рис. 3.21 нижче.

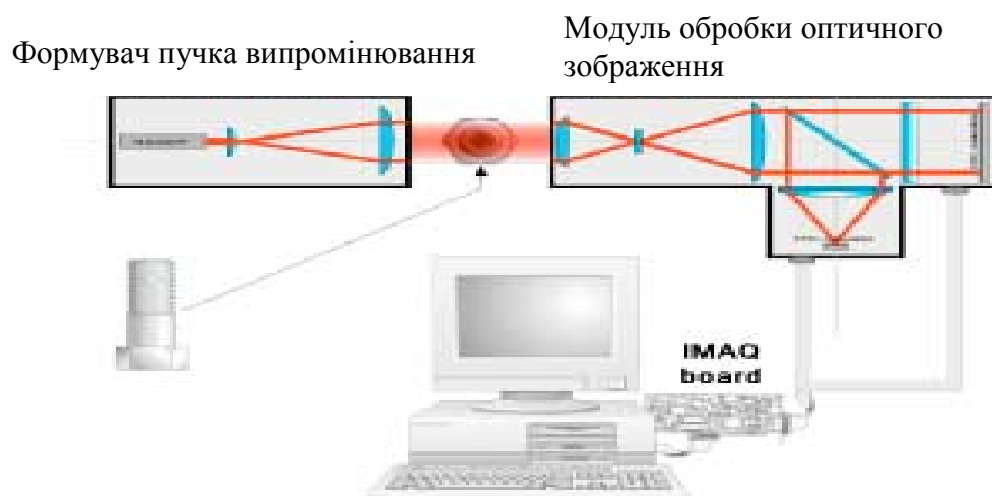


Рис. 3.21. Структурна схема лазерного дифракційного методу вимірювання

Напівпровідниковий лазерний діод використовуються в системі як джерело променя та об'єktiv у якості коліматора. Щоб досягти кращих результатів, дифракційна картина наперед аналізується в оптичному оброблювальному модулі спеціальними оптичними одиницями - фільтри і коректори, структура яких залежить від характеристик об'єкта вимірювання. Потім дифракційний знімок отриманий ПЗЗ камерою «Pulnix TM-7», передається до вбудованого в ПК лабораторію блоку обробку знімків National Instruments PCI-1409.

Далі зображення оброблюється на ПК (рис. 3.22) за допомогою спеціального програмного забезпечення National Instruments Machine Vision – MAQ Vision, Vision Assistant, Vision Builder for Automated Inspection and LabVIEW. Комп'ютерна обробка зображення дозволяє збільшити точність вимірювання аж до 100 разів, що прирівнюють до тіньового методу. Досягнутий діапазон точності складає 0.8 - 2 мкм.



Рис. 3.22. Приклад реалізації лазерної дифракційної системи вимірювання розмірів

Лазерна дифракційна система вимірювання складніша в конструкції і налаштуваннях, вимагає досконалих оброблювальних алгоритмів і високоякісні компоненти але в той же час забезпечує більшу гнучкість - вона може бути легко пристосована для вимірювання об'єктів іншого розміру і форми (табл. 3.5).

Точність вимірювання діаметру у разі іншого об'єктного розміру може погіршати тільки завдяки зміні розташування оптичних одиниць (дзеркала,

лінзи), що змінюється, іншими словами точність була б визначена якістю механічних частин системи

*Табл. 3.5. Список досягнутих (використовуючи відповідну системи) результатів вимірювань розмірів деталей після механічної обробки*

Параметр	Отриманий	Можливий	Примітка
Об'єкт вимірювання			Зовнішній діаметр: циліндри циліндричні шпильки калібрувальні пробки інші деталі як тіла обертання
Параметри вимірювання			зовнішній діаметр будь-якої секції середня величина зовнішнім діаметром довжини циліндра внутрішній і зовнішній діаметри і крок різьби
Точність вимірювання	$\pm 1$ мкм	$\pm 0.5$ мкм	Точність може бути збільшена, використовуючи більш точні камери.
Діапазон вимірювання	0.5 - 30 мм	> 30 мм	Ряд вимірювання обмежений лінзоподібною апертурою. Якщо об'єкт вимірювання складає більш ніж 30-40 мм в діаметрі, то потрібна лінза з дуже широкою апертурою. Проте є декілька схематичних рішень, які можуть вирішити цю проблему як наприклад бісекційний оптичний канал або мультидзеркальні променеві системи формування.
Швидкість	5 вимірювань за секунду	Більше ніж 50000 вимірювань за секунду	Один найбільших переваг цієї технології - потенційно висока продуктивність, яка визначена, діючою швидкістю камери

Перевага використання технічних засобів і програмного забезпечення **National Instruments Machine Vision** - здатність використовувати їх з обома методами вимірювання геометричних параметрів. Використання високопродуктивних індустріальних і персональних комп'ютерів дозволяє збільшити вимірювання і операційну швидкість аналізу аж до 20 вимірювань за секунду, використовуючи аналогові камери або аж до 50000 вимірювань за секунду, використовуючи масиви інформації від ПЗЗ приймача.

Переваги цих методів полягають у наступному:

- Забезпечується 100% контролю розмірів кожної одиниці продукції
  - Виключається «людський чинник» що викликає помилки при вибірковому ручному контролі
  - Контроль розмірів в реальному масштабі часу дозволяє своєчасно внести коректування в технологічний процес і виключити брак
  - досить висока (для машинобудування) точність вимірювань (від 10 мкм) деталей
  - Інтеграція в існуючі виробничі лінії, АСУ ТП і MES
- Додаткові можливості:
- Інтеграція лазерних вимірювачів з приводами верстата і системами керування рухом рушійних органів верстата.
  - Лазерні вимірювальні пристрої можуть встановлюватися безпосередньо на оброблювальне устаткування з метою контролю положення робочого органу або активного контролю якості
  -

Вимірювання за допомогою лазерної техніки надзвичайно перспективна і передова технологія. Вона має такі переваги, як безперервність, безконтактність-відсутність суб'єктивного впливу оператора-контролера виробництва, велика точність, зв'язок з ЕОМ, що надає можливість реєструвати і вчасно виправляти дефекти деталі після механічної обробки. Особливо це стосується надточного металообробного виробництва у приладобудуванні та машинобудуванні.

На сьогодні ступінь насичення лазерним устаткуванням для всіх передових промислових країн став одним з найважливіших - разом з комп'ютеризацією - критеріїв індустріального розвитку. Щорічно в світі продаються багато тисяч одиниць такої апаратури і практично кожен приладобудівний завод в США, Японії і Західній Європі використовує лазерні технології і методики, а багато виробництв без них вже просто неможливо.

Застосування таких приладів значно підвищує продуктивність виробництва, особливо автоматизованого, значно підвищує ресурсозбереження підприємства.

### § 3.3. Контроль параметрів різьби

Необхідність впровадження оптико-електронних приладів у технологічний процес виготовлення та контролю параметрів надточних деталей обумовлена тим, що існуючий довгі роки суб'єктивний ручний і візуальний контроль геометрії різьби виробів за допомогою гладких, різьбових калібрів, зліпків і шаблонів не відповідає сучасним вимогам. Крім того, актуальний контроль геометрії внутрішніх оброблених порожнин, наприклад, шліців і ін.

За допомогою калібрів неможливо провести об'єктивний контроль придатності різьби, оскільки не аналізуються конусність, місцевий знос і навіть крок різьби. При певній комбінації параметрів абсолютно непридатна різьба може бути визнана придатною і навпаки. Фактично за допомогою калібрів контролюється тільки один виток з найбільшим відносним діаметром різьби (або з найменшим), що важко визнати достатнім. Такий контроль призводить до того, що збільшується трудомісткість ремонту, знижується термін служби деталі, і в той же час не виключає пропуск браку. При контролі за допомогою калібрів визначаються не дійсні значення параметрів, що перевіряються, а лише приналежність вимірюваної різьби до категорії придатної або дефектної. Окрім цього, результати контролю різьби калібрами значною мірою залежать від суб'єктивних особливостей контролера і умов його роботи.

Неможливий контроль калібрами таких найважливіших параметрів, як висота різьби, форми і значень радіусів западин та верхівки, які власне і забезпечують міцність колон і герметичність з'єднань. Тому для контролю цих параметрів вибірково роблять зліпки з різьби, які обміряють візуальним способом на мікроскопі. В цілому, на ручний суб'єктивний контроль за допомогою зліпків потрібно до двох діб. При чому такий контроль має значку погрішність внаслідок великої усадки зліпків.

При вимірі кроку різьби користуються прохідним лазерним випромінюванням. Деталь установлюється в центрах або призмах центрової бабки, при цьому вісь центрів, що одночасно є віссю вимірюваної деталі, розташовується паралельно вимірювальному напрямку (поздовжньому переміщенню стола).

Після установки різьбового виробу в центровій бабці штанга її разом з укріпленим виробом нахиляється на кут підйому різьби  $\varphi$ , що визначається по формулі:

$$\operatorname{tg} \varphi = S / (\pi \cdot d_{\text{cp}})$$

де:

$S$  – крок різьби;

$d_{\text{cp}}$  – середній діаметр різьби.

На практиці, замість підрахунку кута підйому різьби, нахиляють штангу центрової бабки разом з укріпленим виробом до одержання однакової різкості зображення лівої й правої сторін профілю різьби.

Після цього сполучають за допомогою поздовжніх і поперечного мікрометричних гвинтів зображення сторони профілю різьби з перекрестием екрана й роблять відлік по барабані поздовжнього мікрометричного гвинта, потім сполучають із перекрестием відповідну сторону сусіднього витка профілю різьби. Різниця отриманих отсчетов дасть величину кроку.

Внаслідок неточної установки осі центрів і перекосу різьби щодо осі центрових отворів бабки, крок може бути обмірюваний у напрямку, не паралельному дійсній осі різьби, що може викликати істотні погрішності. Для виключення цих погрішностей крок різьби вимірюється по лівих і правих сторонах профілю. Дійсне значення кроку приймається рівним середньому арифметичному з результатів виміру. Для виключення похибок від перекосу різьби у вертикальній площині вимір виробляється з боку, зверненого до контролера, та із протилежної сторони виробу.

Найпоширенішими методами контролю різьби малих діаметрів і модулів (менш 1 мм) різьбових калібрів і мітчиків є: метод виміру на інструментальному мікроскопі; метод виміру на проекторі за допомогою скляної лінійки, накладеної на зображення, або проекторного креслення.

Первый метод застосовується тільки при простій формі й при малій кількості контрольованих деталей. В інших випадках контроль здійснюється другим методом.

При перевірці контуру зображення по проекторному кресленню його сполучають у центрі поля зору й щільно притискають до скляного екрана. Контрольована деталь за допомогою центрів або призми встановлюється на предметному столику проектора. При цьому контрольований профіль деталі повинен перебувати в площині, паралельній предметному столу. Точне підведення деталі, тобто сполучення зображення із кресленням досягається обережним пересуванням предметного столика з контрольованою деталлю. Відхилення між кресленням і зображенням вимірюється за допомогою мікрометричних гвинтів. Для додання стабільності й довговічності проекторному кресленню, накресленому на кальці, його фотографують на пластинку.

Точні й складні проекторные креслення варто вичерчувати на координатно-розмічальних машинах. У цьому випадку як матеріал для креслення приймається не калька, а скло, густо покрите чорною фарбою. Креслення, виконаний на склі, фотографується або безпосередньо друкується конкретно на фотопластинку.

При перевірці профілю різьби в машинних мітчиків проекторний креслення дозволяє контролювати крок, половину кута профілю й внутрішнього діаметра одночасно. На кресленні дається одnobічне зображення профілю різьби.

Для перевірки внутрішнього діаметра нанесена лінія, паралельна осі, на відстані, рівній найбільшому діаметру різьби. Паралельно їм нанесена друга

лінія на відстані, рівній найменшому зовнішньому діаметру (для наближеної перевірки зовнішнього діаметра) (рис. 3.23).

Для перевірки відхилення кроку через 10 витків вычерчується 11 витків. Десять перших витків вычерчуються по номінальних розмірах профілю; для крайнього одинадцятого витка даються два граничних положення, які зрушені відносно один одного на допуск по кроку ( $2\Delta S$ ), а щодо номінального - на плюс-мінус відхилення по кроку ( $\pm\Delta S$ ).

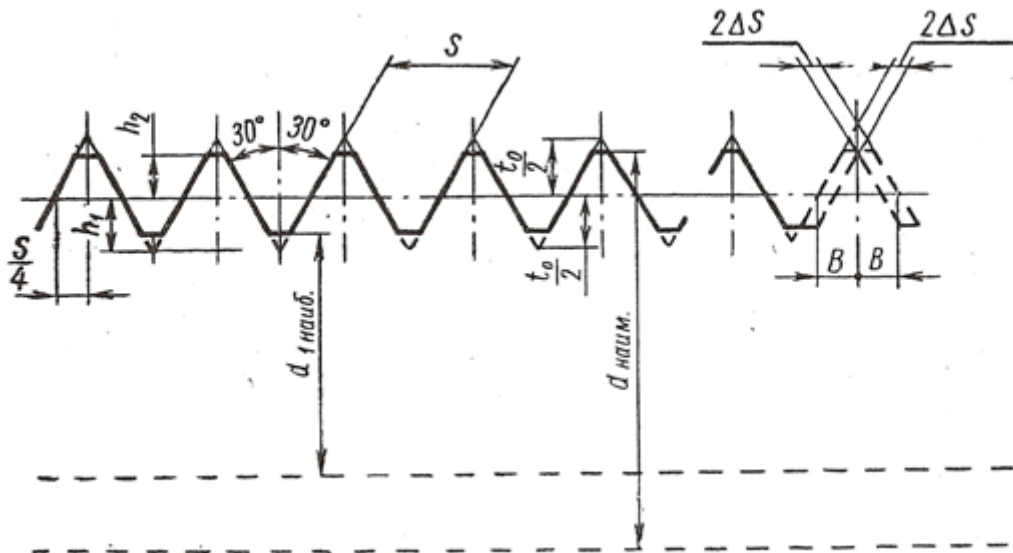


Рис. 3.23. Проекторне креслення для перевірки профілю різьби у мітчиків

При перевірці половини кута профілю бічні сторони кожного витка окремо повинні точно вписуватися між бічними сторонами профілю різьби, зображеному на кресленні (при установці калібру по внутрішньому діаметрі). Якщо це не дотримується, то необхідно виміряти половини кута профілю різьби на мікроскопі. Мітчик при перевірці рекомендується встановлювати по внутрішньому діаметрі. Крок різьби калібрів-пробок з модулем менш 1 мм при контролі на проекторі зі збільшенням  $100\times$  варто вимірювати через кожні 4 або 5 витків із двох сторін по правих і лівих сторонах профілю. За дійсне значення кроку на даній ділянці приймають середнє арифметичне чотирьох значень, отриманих при вимірі.

Наразі для вимірювання геометрії поверхонь застосовують найчастіше методи лазерної дефектоскопії: тіньовий і тріангуляційний. Їх сукупність дає можливість визначити якість обробки поверхні, її дефекти, контури деталей, а також профіль поверхні виробу. Проте масове застосування їх обмежене. Цьому сприяє низка причин.

Для лазерних дефектоскопів максимально досяжна точність вимірювань визначається флуктуаціями потужності випромінювання лазера. При

використанні тіньового методу виникають обмеження, пов'язані з швидкістю, розмірами робочої зони і синхронізацією результатів вимірювань декількох вимірників.

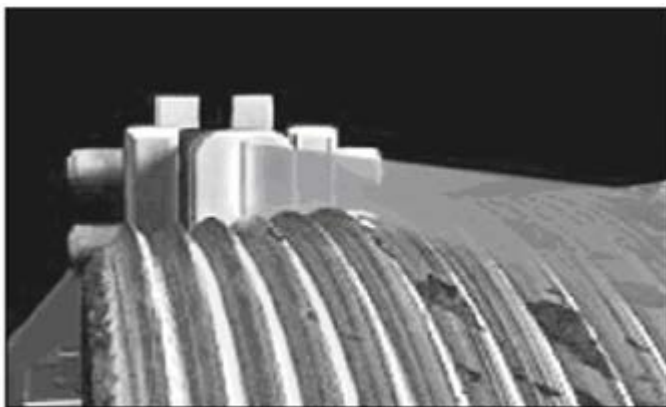
Лазерні триангуляційні вимірювачі розвиваються найактивніше, проте їх масове застосування обмежено. Причина цього в тому, що виробники розраховують роботу своїх приладів з поверхнями, що мають рівномірне розсіювання і розташованими ортогонально зондуємому лазерному пучку. Реальна поверхня завжди шорстка, може мати подряпини, іржу, сліди механічної обробки, отвори. Внаслідок цього прилад, розрахований на похибку у 10-50 мкм, має похибку у міліметри.

Отже, комплексне рішення питань, які підвищують точності вимірювань лазерних дефектоскопів, тіньових і триангуляційних вимірників, є актуальною науково-технічною проблемою, що має важливе практичне значення.

В процесі вимірювання беруть участь лазер, поверхня об'єкту і фотоприймальний пристрій з оптичною системою. Кожний з них може вносити похибку в процес вимірювання. Принцип вимірювання за вищезгаданими методами заснований на скануванні профілю різьби лазерним променем. Сканування здійснюється за допомогою переміщення лазерних головок оптико-механічного блоку системи відносно вимірюваної поверхні різьби. У штатному режимі виріб подається по лінії транспортування і фіксується упором-центратором. Для здійснення вимірювань геометрії різьби передбачені відповідні режими сканування і розрахунки її специфічних параметрів.

Внаслідок сканування різьби виробу вимірюються профілограми поперечного перетину, як інтегральні, тобто середні параметри по всіх витках різьби, так і диференціальні – параметри кожного витка, що дає повну інформацію про фактичний профіль різьби виробу, включаючи розрахункові параметри, які зберігаються в пам'яті комп'ютера, передаються в АСУ ТП і можуть виводитися на екран і на друк.

Робота вимірювальної системи заснована на тіньовому і триангуляційному способах вимірювань з використанням напівпровідникових лазерів.



Тіньовий спосіб використовується для вимірювань профілю зовнішнього різьби і зовнішньої фаски (рис. 3.24).

Рис. 3.24. Приклад тіньового методу вимірювання різьби



Тіньова проекція різьби виходить при опромінюванні виробу вузьким лазерним променем у вигляді смуги, який прямує з лазерного випромінювача на фотоприймальний пристрій. Ширина аналізованої смуги складає 0,01- 0,02 мм.

По положенню перетину лазерним променем кромки об'єкту формується відеоімпульс відеосигналу, часове положення якого вводиться в комп'ютер у вигляді коду. Одночасна фіксація поточного положення кромки і координат скануючих головок по положенню столу дозволяє зареєструвати профіль різьби. [2] Функціональна схема даного методу наведена нижче (рис. 3.25).

Чотири тіньові вимірювачі (рис. 3.25,а) з випромінювачами 1 і лінійними фоточутниками 2 на основі ПЗЗ охоплюють все коло поперечного перетину різьби 4. При скануванні механічний привід пропускає різьбу крізь комплект лазерних вимірників з кроком, рівним необхідній точності вимірювань (0,1 мм). Показання тіньових чутників передаються в центральний комп'ютер, де по спеціально розробленому алгоритму обчислюються такі параметри різьби, як

1. крок повитковий і середній;
2. висота повиткова і середня;
3. діаметри повиткові (по вершині, западині і середній) і приведені до торця;
4. радіуси закруглення вершин і западин;
5. кути нахилу бічних сторін;
6. відстань до основної площини і до збігу;
7. конусність і кут нахилу;
8. кути, висота зовнішньої і внутрішньої фасок різьби;
9. неспіввісність осей виробу і різьби;

За наслідками вимірювань робиться висновок про стан різьби.

Пучок випромінювання лазера 1 (рис. 3.25,б) розширюється в одній площині лінзами 5 і 6. Відношення фокусних відстаней цих лінз рівне відношенню широкої частини лазерного пучка на виході лінзи 6 до діаметру лазерного пучка на виході лінзи 5. Паралельність променів на виході лінзи 6 дозволяє одержати чітку тінь, що відкидається вимірюваним виробом через лінзу 7 і інтерференційний фільтр 8 на лінійний фоточутник 2. Вимірюваний розмір визначається підрахунком числа пікселів, що потрапляють в тінь виробу.

Така система вимірювання забезпечує без введення додаткової програмної обробки чутливість

$$\Delta\lambda = D/n = 100 : 2048 = 0,048 \text{ мм}$$

де  $D$  - величина широкої частини пучка лазерного випромінювання, мм;  $n$  - число пікселів в лінійному фоточутнику.

Нелінійність розгортки лазерного променя, обумовлена аберацією оптичної системи, компенсується шляхом введення відповідної програми в комп'ютер 10. Для підвищення точності вимірювань використовується компенсація зміни потужності випромінювання відведенням части потужності лазерного пучка світлоділильною пластиною 11 на пристрій коректування часу експозиції 12. При цьому зміна потужності компенсується зміною часу

експозиції таким чином, що вплив нестабільності потужності на точність вимірювань виключається.

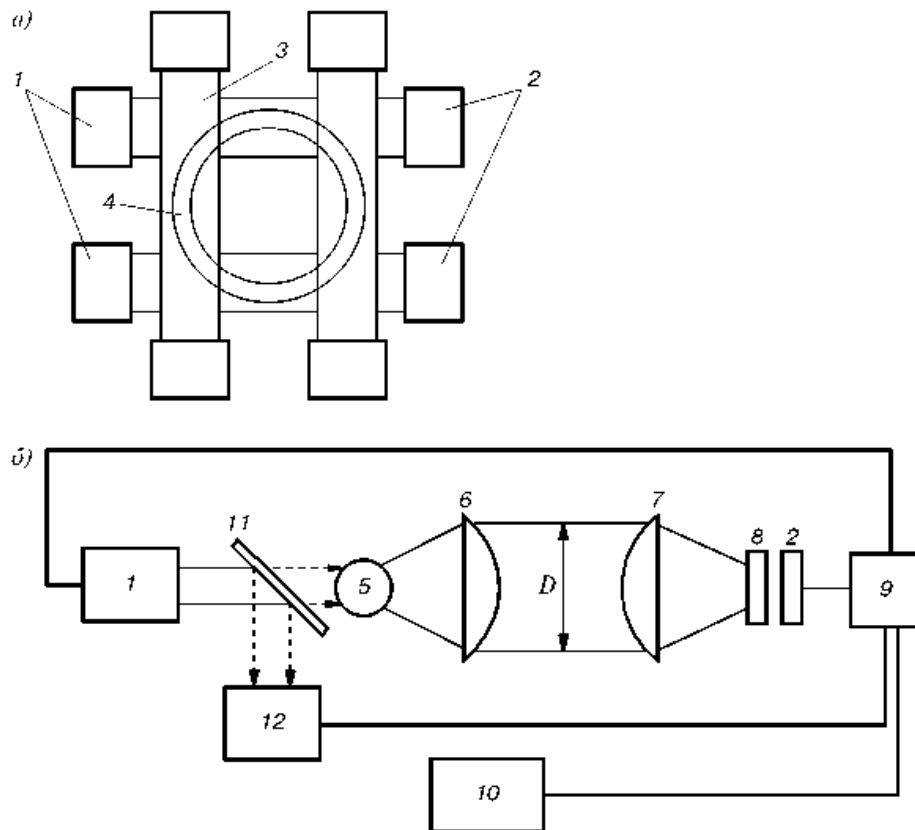


Рис. 3.25. Функціональна схема тіньового лазерного вимірювача:

*а* - схема розташування чутників; *б* - функціональна схема вимірювального чутника з компенсацією змін потужності випромінювання; 1 - лазерні випромінювачі; 2 - лінійний фоточутник ПЗЗ-приймвч; 3 - лазерний промінь; 4 - вимірювана різьба; 5 - короткофокусна циліндрична лінза; 6 - вихідна циліндрична лінза; 7 - входна циліндрична лінза; 8 - інтерференційний фільтр; 9 - контроллер; 10 - комп'ютер; 11 – світоділильна пластина; 12 - пристрій коригування часу експозиції

Тріангуляційний спосіб використовується для вимірювань профілю внутрішньої поверхні різьби, включаючи профіль внутрішньої фаски на торці, а також для вимірювання товщини стінки різьби з урахуванням тіньової проекції зовнішньої поверхні деталі, зокрема під западинами різьби.

Електронний блок системи забезпечує відповідну обробку сигналів фотоприймальних блоків в необхідному динамічному діапазоні змін інтенсивності для виділення інформації про одночасне положення двох кромek і центру вузького лазерного променя і положення координатного столу. Ці коди, відповідно профілю різьби і внутрішньої поверхні різьби, вводяться в

комп'ютер. Для забезпечення вимірювань необхідних типорозмірів різьби і відповідно діапазону вимірювань використовуються два тінювих і один триангуляційний канал вимірювань, всього три канали і ще один канал для знімання координат скануючих лазерних головок по положенню столу.

Лазерні головки, які автоматично переміщаються щодо об'єкту контролю дозволяють одержати перетин об'єкту і зафіксувати його в пам'яті комп'ютера. Це дає повну інформацію для відновлення профілю виробу.

Автоматичні вимірювання геометрії різьби проводяться за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення системи, яке дозволяє проводити розрахунок параметрів різьби, відображати і реєструвати значення фактичного профілю різьби на кожен типорозмір виробів. Сканування перетину різьби проводиться безконтактно і з достатньо високою продуктивністю - один перетин за 5-6 с. Результати вимірювань відображаються в наочній формі, реєструються і зберігаються в пам'яті комп'ютера і на машинних носіях інформації необмежений час. Крім того, вони можуть видаватися у вигляді протоколів на папері. На основі даних результатів проводяться коректуючі дії (рис. 3.26).

Алгоритм коригуючих і застережливих дій представлений на схемі вище (рис. 3.26). При проведенні моніторингу за допомогою даних систем реєструються параметри різьби в режимі онлайн. Як тільки параметри різьби виходять за поля допуску, регламентований ГОСТ 633-80, відповідний сигнал надходить на робочу станцію АСУ ТП. Він оброблюється обчислювальним комплексом за допомогою спеціального програмного забезпечення і далі надходить на пульт верстата з числовим програмним керуванням.

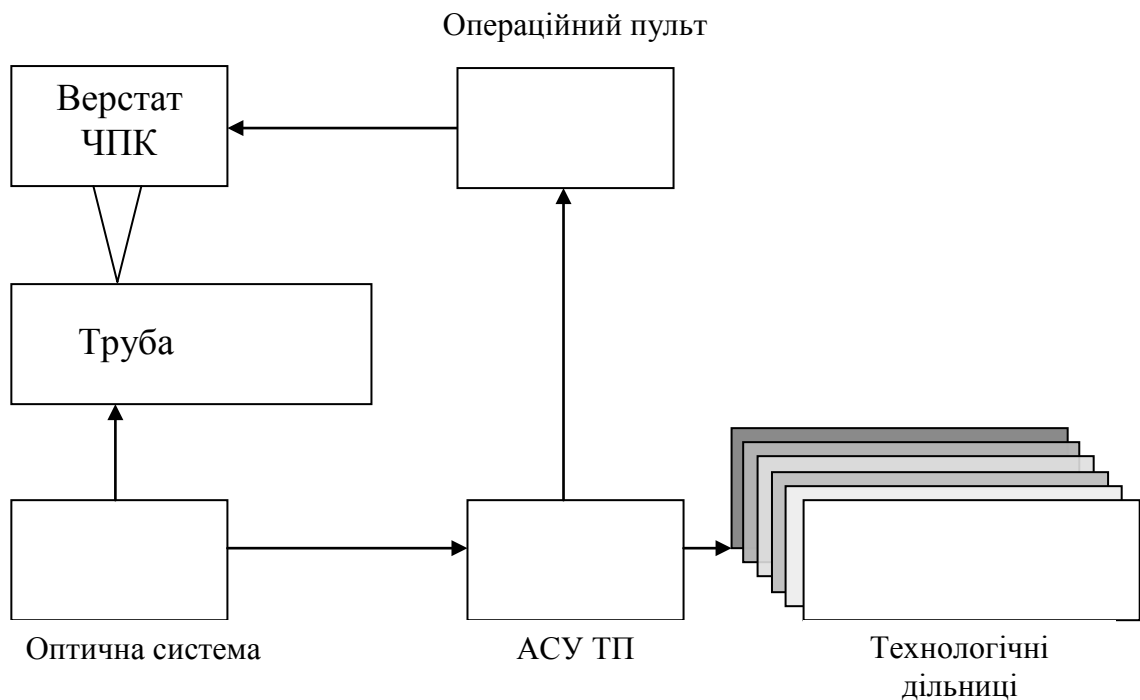


Рис. 3.26. Блок-схема алгоритма коригуючих попереджувальних дій

Програма, яка керує технологічним процесом, вносить відповідні корективи в режим роботи верстата і призводить параметри нарізування різьби відповідно до вимог ДСТУ. Одночасно комп'ютер робочої станції АСУ ТП проводить аналіз причин виходу параметрів за поле допуску (порушення роботи верстата, рольгангів, нестандартна труба, дефекти на поверхні труби тощо) і передає інформацію на пульт оператора для проведення застережливих дій. Залежно від виду причин інформація надходить на відповідні ділянки технологічного процесу виробництва (ділянка очищення, вхідний неруйнуючий контроль, шаблонування, механічна ділянка і т. п.), де відбувається усунення причин, що спричинили брак різьби.

### § 3.4. Основні засади дії оптико-електронних приладів контролю шорсткості поверхні та структури деталі

Для вимірювання геометричних розмірів та шорсткості поверхні оброблюємих деталей є перспективними також безконтактні методи із застосуванням лазерної техніки. Засади дії оптико-електронних пристроїв контролю якості поверхні прецизійних деталей (рис. 3.27) полягають у використанні ефекту розсіюння світла контрольованою поверхнею, кутовий розподіл якого залежить від шорсткості.

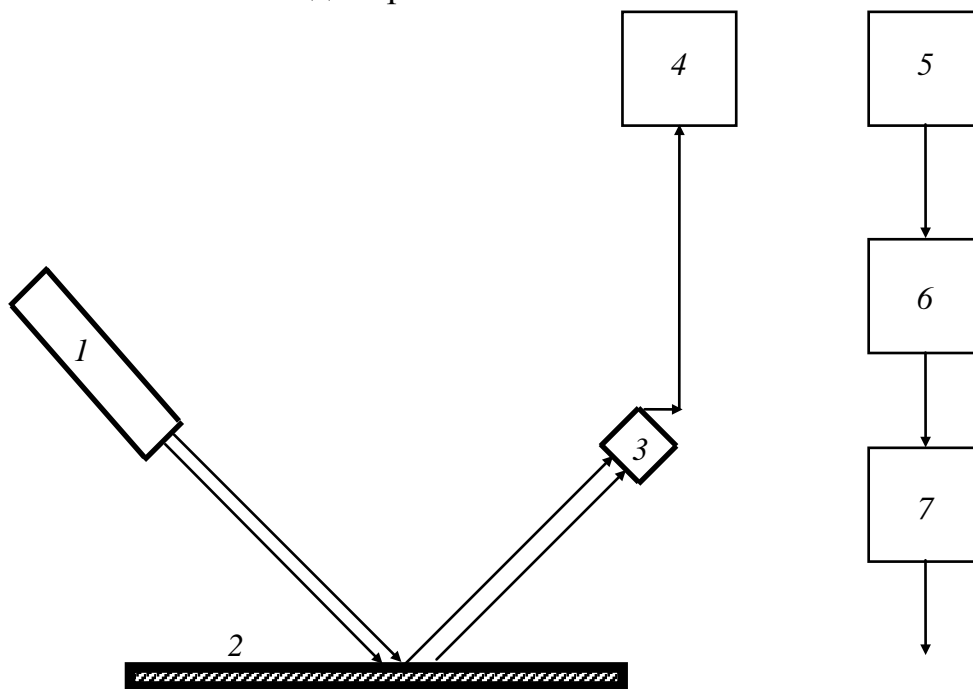


Рис. 3.27. Узагальнена схема вимірювального оптико-електронного приладу для виробничого контролю якості деталей: 1 - джерело випромінювання, 2 - контрольований об'єкт, 3 - фотодетектор, 4 - аналізатор, 5 - блок обробки сигналів, 6 - блок формування команд керування, 7 - виконавчий орган верстату

Розсіяні світлові пучки збираються оптичною системою і через світлоподільувач надходять на матрицю фотоприймачів. З підвищенням шорсткості збільшується кутова розбіжність розсіяваних пучків.

На рис. 3.28 показаний один з методів контролю якості обробленої поверхні із застосуванням лазерного променя. Вище вже відзначалось, що шорсткість поверхні є одним з найважливіших параметрів (критерієв), що характеризують якість процесу механообробки ті всієї виробничої технологічної системи.

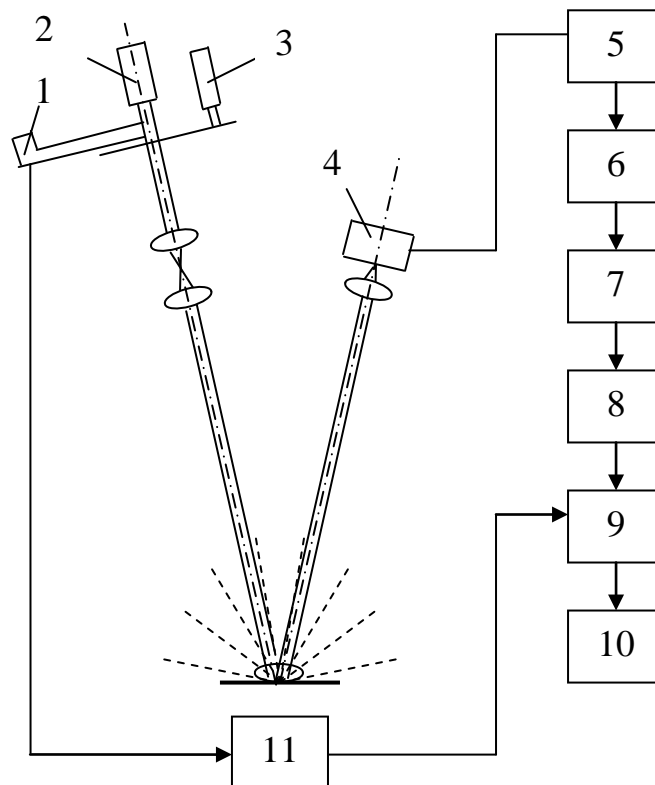


Рис. 3.28. Вимірювання шорсткості поверхні з використанням лазерного променя: 1, 4 – еталонний та вимірювальний детектори; 2 – лазер; 3 - переривач; 5, 11 – підсилювачі; 6, 8 – фільтри; 7 – випрямляч; 9 – блок порівняння, 10 – вимірювальний пристрій

Застосування даного методу контролю засновано на залежності між інтенсивністю прямого та відбитого променів та шорсткістю поверхні, при цьому приймаються в увагу вигляд операції обробки та коефіцієнт поглинання матеріалу, що оброблюють.

Оскільки перерозподіл полів напруги в матеріалі заготовки спричиняє за собою розподіли хвиль пружної деформації на поверхні різального інструмента, спектральні характеристики поверхневих акустичних хвиль можна так само

визначати за допомогою оптико-електронних гібридних процесорів. Так, ефективна система вимірювання шорсткості поверхні деталі може бути побудована на явищі акустооптичних взаємодій лазерного випромінювання на акустичному бігучому імпульсі.

Функціональна схема оптичної системи пристрою приведена на рис. 3.28. Параметри шорсткості визначаються аналізом статистичних характеристик розсіяного випромінювання на поверхні деталі [3.6]. Здійснюється аналіз спектральних складових сигналів у діапазоні частот понад 1 ГГц. Проте флуктуації потужності лазера можуть негативно впливати на характеристики оптичної системи і в цілому на достовірність контролю. Тому необхідний стабілізація потужності випромінювання, яка може здійснена за допомогою фотопружного АОМ. При цьому можна поєднувати цей метод з одночасним аналізом об'ємних акустичних хвиль. Це підвищує продуктивність контрольованих виробничих процесів, оскільки оцінюється перебування різального інструмента на макро- і мікрорівнях, але має обмеження, характерні для прямих оптичних методів вимірювання.

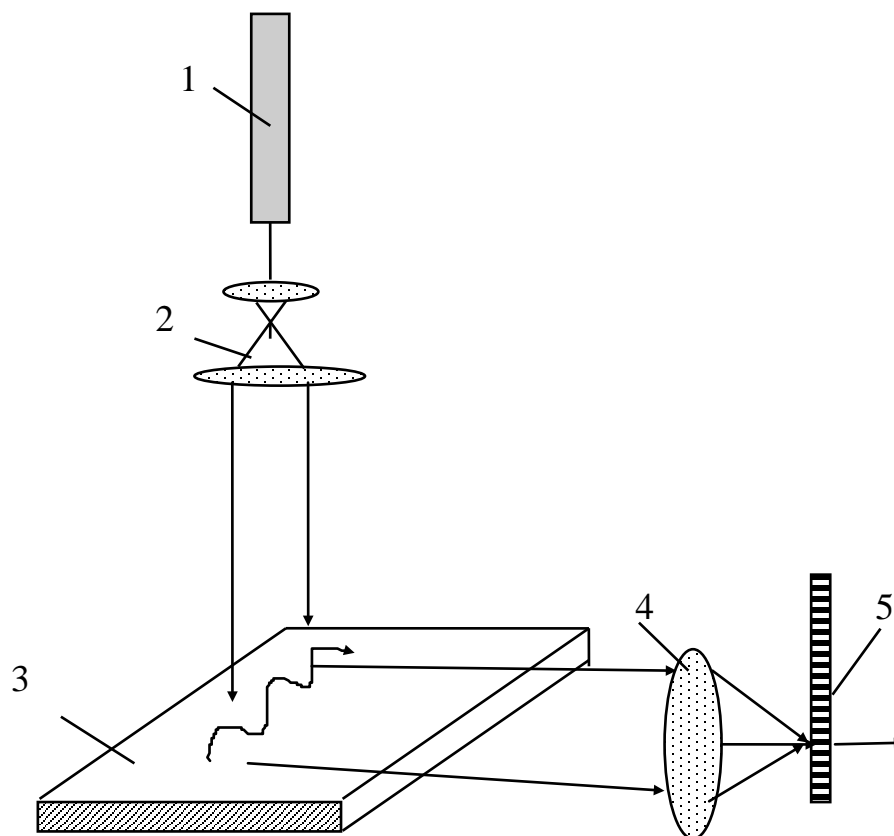


Рис.3.28. Функціональна схема лазерного пристрою контролю якості по поверхневих акустичних коливаннях: 1 - лазер, 2 - оптична перетворююча система, 3 - контрольований зразок, 4 - об'єктив, 5 - фотоприймальний пристрій

Останнім часом велика увага приділяється вивченню статистичних характеристик флуктуації коефіцієнта пропущення емульсій [3.7] і коефіцієнта відбиття дзеркальних поверхонь [3.8] деталей. Ці дослідження мають метою покращення якості виготовлення прецизійних деталей. Зазвичай вважають, що двовимірний випадковий процес, що характеризує флуктуації коефіцієнтів пропущення й відбиття, є ергодичним і стаціонарним. Тому здебільшого обмежуються дослідженням виключно середнього значення, дисперсії, автокореляційної функції й просторового спектра Вінера цих процесів. Існує низка методів виміру статистичних характеристик випадкових просторових процесів, в основі яких лежать оптико-електронні способи [3.7, 3.8] вимірювань. У більшості випадків вони дозволяють знайти лише одну характеристику процесу й вимагають великої кількості вимірів і різних обчислень.

Розглянуто метод визначення просторового спектра Вінера флуктуації амплітудного коефіцієнта пропущення фототранспаранта, на якому записана просторова випадкова функція  $t(x, y)$ . Ця функція може характеризувати гранулярність фотоемульсії, мікродфекти дзеркальної поверхні тощо. Розглянутий метод дозволяє також оцінити ступінь анізотропії об'єкта.

Фототранспарант містився в когерентній оптичній системі, яка наведена на рис. 3.29. Когерентний пучок світла від He-Ne лазера з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 0,6328$  мкм, що працює в одномодовому режимі, через телескопічну систему 2 рівномірно освітлював фототранспарант 3, розташований у передній фокальній площині об'єктива 4 з фокусною відстанню  $f = 350$  мм. Відповідно до дифракційної теорії поширення когерентного монохроматичного випромінювання розподіл амплітуди світлового нуля в задній фокальній площині 5 об'єктива 4 описується виразом [3.9]

$$U(x_f, y_f) = \frac{A}{j\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp \left[ -\frac{j2\pi}{\lambda f} (xx_f + yy_f) \right] dx dy, \quad (3.4)$$

де  $A$  – амплітуда плоскої світлової хвилі, що падає на фототранспарант;

$f$  – фокусна відстань об'єктива;

$x_f, y_f$  – компоненти декартової системи координат, обраної в задній фокальній площині 5;

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера.

Отже, функція  $U(x_f, y_f)$  з точністю до множника  $\frac{A}{j\lambda f}$  являє собою просторовий амплітудно-фазовий спектр функції  $t(x, y)$  із просторовими частотами

$$f_x = \frac{x_f}{\lambda f} \quad \text{з} \quad f_y = \frac{y_f}{\lambda f}. \quad (3.5)$$

Розподіл освітленості  $E(x_f, y_f)$  у площині 5 реєструвався на фотоплівку. Вимірювання проводилось скануючою вузькопольною фотоелектричною

системою, що складається з діафрагми 6 діаметром 0,2 мм, фотодіода 7 і мікровольтметра 8.

Оскільки

$$E(x_f, y_f) = |U(x_f, y_f)|^2, \quad (3.6)$$

функція  $E(x_f, y_f)$  пропорційна просторовому спектру Вінера  $W(f_x, f_y)$  випадкової функції  $t(x, y)$ .

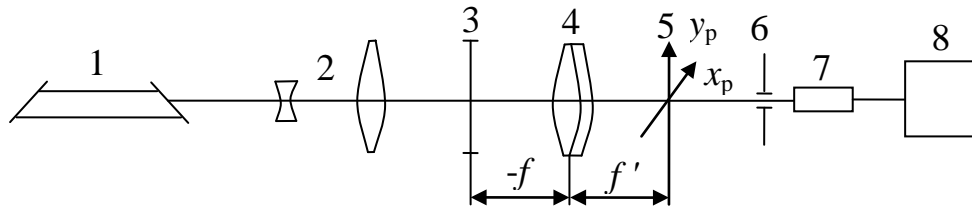


Рис. 3.29. Оптична схема когерентного просторового спектроаналізатора

За допомогою цього устаткування досліджувалися різні випадкові функції  $t(x, y)$ , що являють собою найбільш характерні розподіли зернистості фотоемульсій і мікродефектів полірованих поверхонь деталей. На рис. 3.30,а показана ізотропна модель зернистості фотоемульсії або феритової полірованої поверхні [3.7, 3.8].

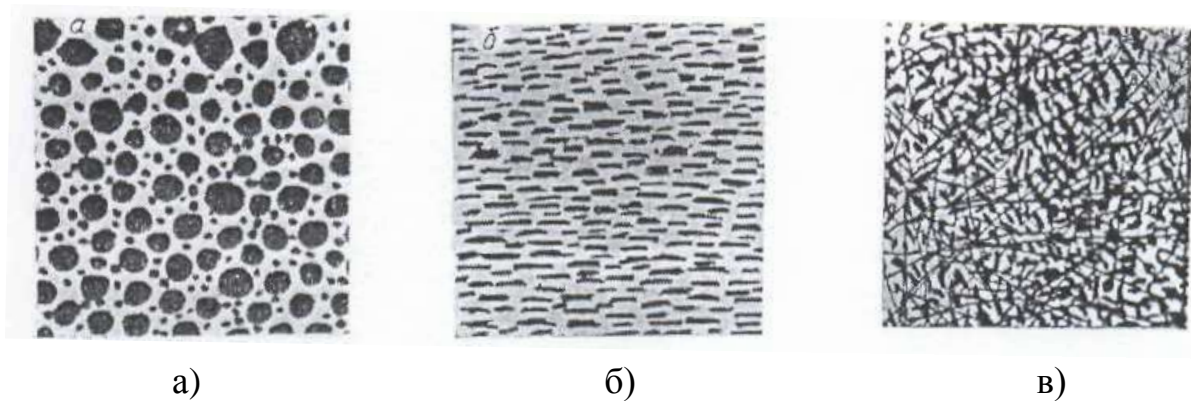


Рис. 3.30. Статистичні моделі розподілу мікродефектів: а – зернистість емульсій і феритових полірованих поверхонь; б – випадкова періодична структура мікроподряпин поверхонь; в – мікроструктура полірованих поверхонь

Анізотропна функція  $t(x, y)$  з наявністю періодичності в структурі наведена на рис. 3.30,б. Математичний аналіз таких структур показує, що спектр Вінера також анізотропний і має максимум на просторовій частоті  $f_m$ ,



що залежить від середнього періоду мікродефектів у структурі, причому анізотропія більше дрібних мікродефектів відповідає розтягуванню спектра Вінера у перпендикулярному напрямку, а  $f_m = 1/\bar{a}$ , де  $\bar{a}$  – середній період мікродефектів у даному напрямку [3.10]. Модель, що характеризує розподіл мікродефектів (подряпин, вкраплень, раковин і т.п.) більшості полірованих поверхонь, зображена на рис. 3.30,в. Визначити візуально анізотропію мікродефектів такої поверхні не є можливим.

Просторові спектри Вінера на рис. 3.31,а,б,в отримано за допомогою описаного експериментального устаткування. Нормовані розподіли опромінення  $E_n(0, f_y)$ , обмірювані скануючою вузькопольною фотоелектричною системою, представлені кривими а, б, в, на рис. 3.32 відповідно.

Аналізуючи спектр Вінера на рис. 3.31,а можна відзначити, що структура на рис. 3.30,а є ізотропною, спектр Вінера якої зручно апроксимувати виразом [3.8]

$$W(f_r) = 2\pi\sigma^2 r_k^2 \exp(-4\pi^2 r_k^2 f_r^2), \quad (3.7)$$

де  $\sigma^2$ -дисперсія флуктуації коефіцієнта пропущення або відбиття;

$r_k$  – радіус кореляцій флуктуації;

$f_r = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$  – просторова частота в полярній системі координат.

Спектр на рис. 3.31,б свідчить про анізотропію структури та наявність

максимуму в спектрі Вінера на частоті  $f_m = \frac{yf_m}{\lambda f}$ , звідки середній період

мікродефектів  $\bar{a} = 1/f_m = 0,277$  мм. Ці результати добре збігаються з даними

вимірів середніх розмірів прозорих  $\bar{a}_c$  непрозорих  $\bar{a}_T$  ділянок уздовж осі у.

Виміри за допомогою мікроскопа зі збільшенням  $23^x$  показали, що

$\bar{a} = \bar{a}_c + \bar{a}_T = 0,126 \text{ мкм} + 0,167 \text{ мкм} = 0,293 \text{ мкм}$ .

Спектр Вінера на рис. 3.31,в свідчить про слабку анізотропну функцію  $t(x,y)$ , представленої на рис. 3.30,в, а у самій структурі не спостерігається ніякої періодичності. Обчисливши площали під кривими на рис. 3.32, можна визначити дисперсію флуктуації в даному перетині, оскільки

$$\sigma_y^2 = k(0) = \int_{-\infty}^{\infty} W(0, f_y) df_y, \quad (3.8)$$

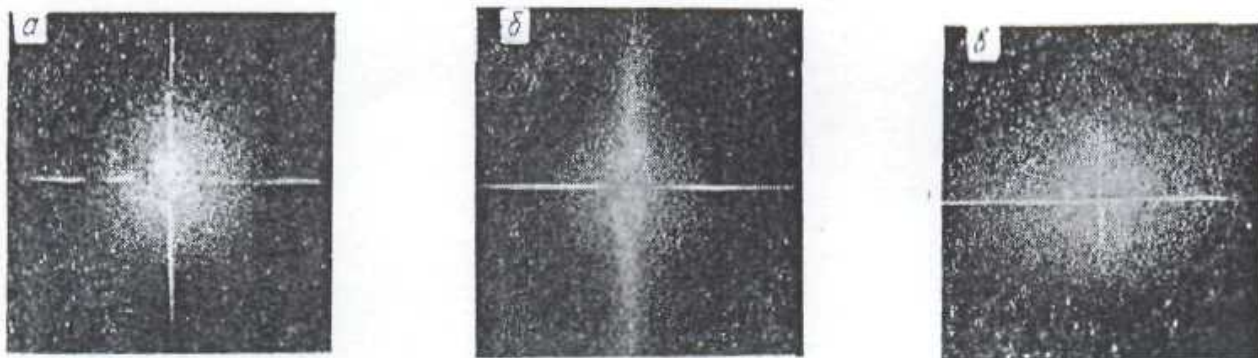


Рис. 3.31. Спектри Вінера статистичних моделей, показаних на рис. 5.2, а, б, в відповідно

Отже, описана методика дозволяє визначати спектр Вінера та дисперсію флуктуації коефіцієнтів відбиття й пропущення, а також ступінь анізотропії мікродфектів поверхонь, що відбивають, а також прозорих плівок.

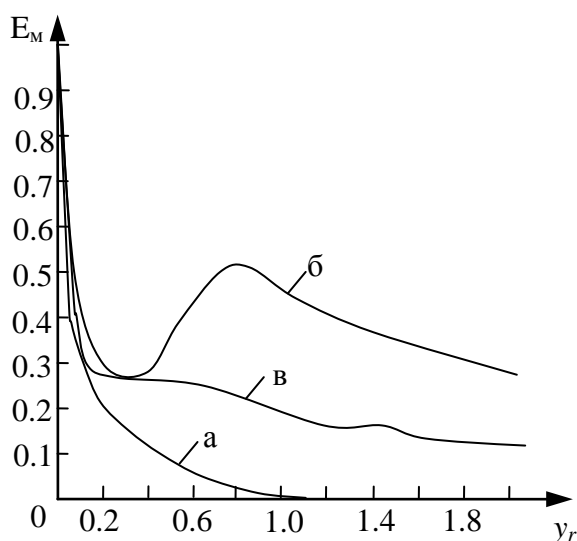


Рис. 3.32. Розподіл нормованих спектрів Вінера статистичних моделей, представлених на рис. 3.30, а, б, в відповідно

Наразі у сучаній приладобудівній промисловості досить часто використовують матеріали волокнистої структури, що виготовляють у тому числі і механічною обробкою. Здебільшого деталі з таких матеріалів призначені для фільтрації рідких і газових середовищ, капілярного транспорту,

шумопоглинання, теплоізоляції тощо, обумовлений їхньою здатністю повною мірою задовольняти комплексу вимог, пропонованих до матеріалів такого призначення [3.11, 3.12]. Оскільки рівень властивостей пористих волокнистих матеріалів нерозривно пов'язаний з параметрами їхньої структури - розміром пор, пористістю, геометричними розмірами й формою волокон, їхнім розподілом у матеріалі тощо,- для кожного конкретного випадку застосування даних матеріалів, особливо для роботи в екстремальних умовах, необхідна оптимізація цих характеристик. Тому практичний інтерес представляє активний контроль основних характеристик структури волокнистих матеріалів у процесі її формування, а також у готовому виробі.

Найпоширенішим видом напівфабрикату волокнистих матеріалів є високопористий аркушевий повсть (рис. 3.33).

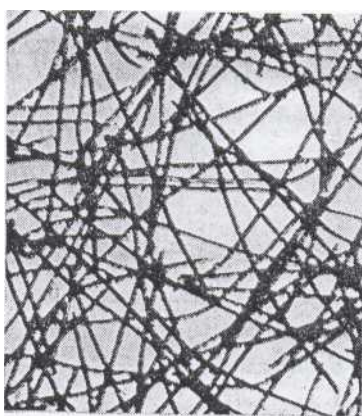


Рис. 3.33. Структура тонкого аркуша пористого волокнистого матеріалу

З одного або декількох шарів такої повсті прокаткою або пресуванням і наступним зміцненням, наприклад спіканням, одержують вироби із заданими параметрами структури й геометричною формою [3.13]. Отже, властивості волокнистих матеріалів формуються вже на стадії одержання напівфабрикату - тонколистової повсті.

Контроль параметрів структури повсті, а також виробів з нього у вигляді тонкого аркуша традиційними методами важко здійснити за відомими причинами. Разом з тим відкриваються можливості вивчення структури даних об'єктів з використанням їхніх оптичних властивостей.

У цьому зв'язку доцільне застосування оптичних методів лазерної дифрактометрії й когерентної оптики [3.9], сутність яких полягає в аналізі дифракційного зображення досліджуваного об'єкта.

Отже, для покращення якості виготовлення визначених деталей приладів необхідно проведення аналізу структури пористих волокнистих матеріалів методами математичної статистики й теорії випадкових процесів, а також установлення взаємозв'язку одного з основних параметрів структури –

пористості з оптичним коефіцієнтом пропущення волоконних матеріалів у рамках єдиного ймовірносно-статистичного підходу.

Статистичну модель волокнистого матеріалу введемо на підставі складеного випадкового процесу, описуваного функцією  $P(A)$  [3.14], що приймає нульові значення, якщо крапка  $A$  перебуває усередині волокон, і дорівнює одиниці поза ними. Первинним при цьому будемо вважати процес розподілу геометричних центрів волокон в обсязі матеріалу, що являє собою тривимірний рекурентний потік [3.13], тобто тривимірний потік з обмеженою післядією. Під післядією тут розуміється неможливість як завгодно близького розташування двох і більше центрів, тобто взаємного проникнення волокон друг у друга. Якщо навіть припустити, що взаємопроникнення волокон у крапках контакту все-таки можливо, проте первинний потік матиме властивості стаціонарності, ординарності й відсутності післядії. Це дозволяє віднести його до категорії стаціонарного пуассонового потоку й описати ймовірність  $P_n(V)$  влучення  $n$  центрів у будь-який фіксований обсяг  $V$  законом Пуассона [3.14]:

$$p_n(V) = \frac{(\lambda V)^n}{n!} e^{-\lambda V}, \quad (3.9)$$

де  $\lambda$ , - щільність потоку (середня кількість центрів в одиничному обсязі).

Пропонована модель волоконного матеріалу дозволяє визначити параметри його структури як статистичні характеристики процесу  $P(A)$ . Так, пористість у матеріалі є математичне очікування  $M[P(A)]$  процесу  $P(A)$ , чисельно рівне ймовірності того, що довільна крапка  $A$  не перебуває усередині волокна.

Якщо первинний процес задається пуассоновим потоком із законом розподілу (3.9), математичне очікування визначається як [3.16]

$$M[P(A)] = \exp \left[ -\lambda \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega(\varphi, \psi) \int_V F(\varphi, \psi, V) dV d\varphi d\psi \right], \quad (3.10)$$

де  $\omega(\varphi, \psi)$  – спільна щільність імовірності розподілу кутів  $\varphi, \psi$  орієнтації осей волокон (рис. 3.34);

$F(\varphi, \psi, V)$  – одинично-нульова функція, рівна одиниці, якщо волокно із центром у крапці  $N$  «захоплює» крапку  $A$ , і нулю — у протилежному випадку. Інтеграл  $\int_V F(\varphi, \psi, V) dV$  виражає об'єм тіла, утвореного геометричним місцем

центрів волокна з кутами орієнтації  $\varphi, \psi$ , що накриває крапку  $A$ .

Для визначення математичного очікування (3.10) уведемо наступні умови: волокна являють собою тіла циліндричної форми діаметром  $d$  і довжиною  $l$ ; положення й орієнтація волокон взаємно незалежні; осі волокон паралельні площини аркуша й орієнтовані в ній за законом рівної ймовірності.

Із цих умов слідує, що спільна щільність імовірності кутів  $\varphi, \psi$ , рівна

$$\omega(\varphi, \psi) = \frac{1}{4\pi^2} \delta(\psi). \quad (3.11)$$

де  $\delta(\psi)$  - дельта-функція Дірака [3.15], а

$$\int_V F(\varphi, \psi, V) dV = \pi d^2 l / 4 \quad (3.12)$$

Підставивши (3.11) і (3.12) в (3.10), одержимо

$$\Theta = M[P(A)] = \exp[-\lambda \pi d^2 l / 4]. \quad (3.13)$$

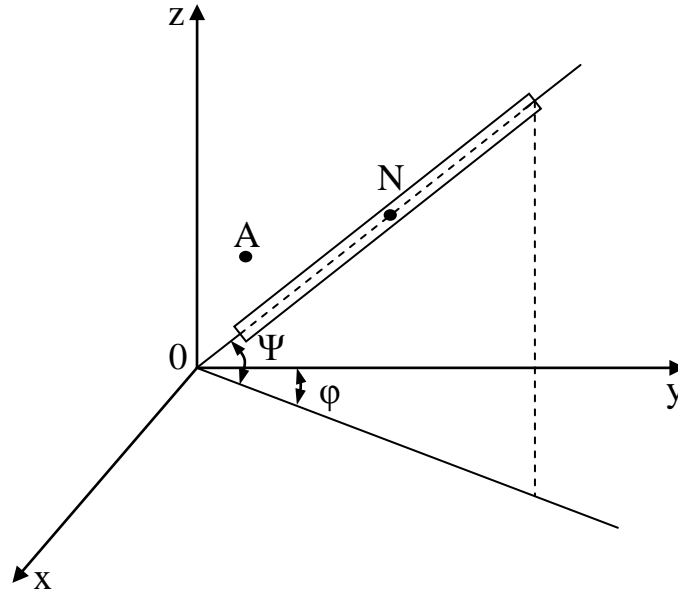


Рис. 3.34. До виводу виразу (3.10)

З іншого боку, пористість волокнистого матеріалу, також залежно від щільності центрів і геометричних розмірів волокон, можна представити виразом

$$\Theta = 1 - \lambda \pi d^2 l / 4, \quad (3.14)$$

оскільки  $\lambda \pi d^2 l / 4$  – частина одиничного об'єму матеріалу, займана волокнами, тобто відносна щільність матеріалу.

Графічні залежності  $\Theta$  від  $\lambda \pi d^2 l / 4$ , отримані з виразів (3.13) і (3.14), представлені на рис. 3.35. Їхнє зіставлення дозволяє встановити межі застосовності пропонованої моделі.

Оптичний коефіцієнт пропущення, що визначається як відношення частини світлового потоку, що пройшов через об'єкт дослідження, до всього потоку, містить у собі інформацію про інтегральну характеристику проекції структури об'єкта на площину, перпендикулярну напрямку світлового потоку. Цей факт використаний у даних дослідженнях для оцінки пористості тонких аркушів волокнистих матеріалів за їхнім коефіцієнтом пропущення. Описана вище запропонована статистична модель волокнистого матеріалу дозволяє встановити функціональний взаємозв'язок його пористості й оптичного коефіцієнта пропущення у межах єдиного ймовірно-статистичного підходу.

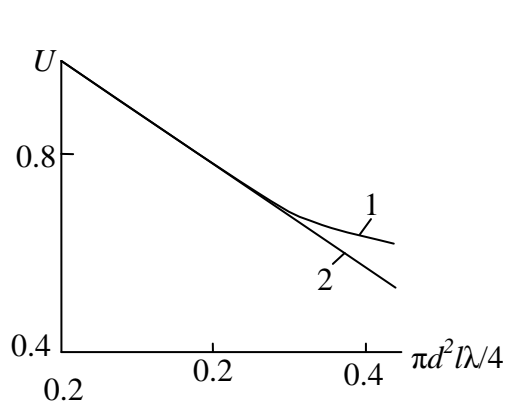


Рис. 3.35. Залежність пористості від щільності центрів, діаметра й довжини волокон: 1 - модель; 2 - реальний матеріал ( $d=0,025$ ,  $l=2,5$  мм)

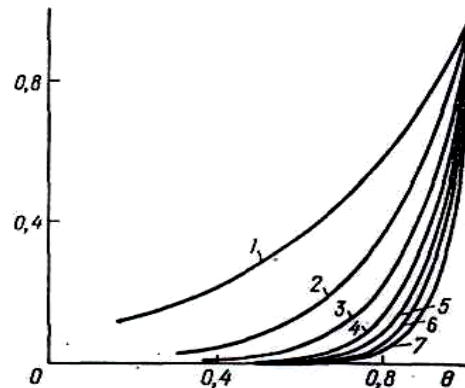


Рис. 3.36. Залежність оптичного коефіцієнта пропускання від пористості волокнистих матеріалів ( $d = 0,025$  мм,  $l = 2,5$  мм).  $h = 50$  (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5), 300 (6) і 350 мкм (7).

Оптичний коефіцієнт пропускання  $T$  листового волокнистого матеріалу визначимо як математичне очікування процесу  $T(A)$ , утвореного проекцією вихідного складеного процесу на площину, паралельну площини аркуша й перпендикулярну напрямку світлового потоку.

Отже, функція є також складним процесом, у якому первинну можна задати двомірним пуассоновим потоком із щільністю  $\lambda \cdot h$  ( $h$  — товщина шару матеріалу).

Оскільки проекції волокон мають вигляд прямокутників довжиною  $l$  і шириною  $d$ , середній коефіцієнт пропускання дорівнює

$$T = M[T(A)] = \exp[-\lambda h l d]. \quad (3.15)$$

Звідси випливає, що коефіцієнт пропускання  $T$  волокнистого матеріалу визначається товщиною  $h$  зразка, щільністю  $\lambda$  центрів волокон з їхніми геометричними розмірами —  $l$  і  $d$ . Виразивши з (3.14) щільність  $\lambda$  як функцію, і підставивши її в (3.15), одержимо залежність, що визначає коефіцієнт пропускання  $T$  у зв'язку з пористістю  $\Theta$ :

$$T = \exp\left[-\frac{4h}{\pi d}(1 - \Theta)\right]. \quad (3.16)$$

Залежності  $T = f(h, \Theta)$ , отримані розрахунком, показані на рис. 3.36. Наявність однозначної функціональної залежності підтверджує можливість визначення пористості виміром коефіцієнта пропускання.

Записавши пористість, як функцію коефіцієнта пропускання, одержимо

$$\Theta = 1 + \frac{\pi d}{4h} \cdot \ln T. \quad (3.17)$$

Для обчислення  $\Theta$  за виразом (3.17) крім коефіцієнта пропускання  $T$  необхідно знати товщину зразка  $h$  і діаметр  $d$  волокон. Довжина  $l$  волокон в даний вираз не входить.

Для перевірки отриманих аналітичних залежностей вимірювали коефіцієнти пропускання зразків, спечених з волокон нержавіючої сталі діаметром 0,025 і довжиною 2,5 мм. Для цього був використаний спектрофотометр ФМ-8. Джерелом освітлення служила лампа розжарювання. За даними вимірів за допомогою виразу (3.17) розраховано пористість зразків.

Крім того, визначали середню щільність центрів волокон у зразках, по якому розраховували коефіцієнт пропускання й пористість, користуючись виразами (3.12) і (3.11).

Аналіз отриманих результатів (табл. 3.6) показує, що експериментальні дані задовільно узгоджуються з теоретичними положеннями.

Табл. 3.6. Результати визначення пористості тонких аркушів волокнистих матеріалів за оптичним коефіцієнтом пропускання

Товщина, мм	Щільність центрів, мм <sup>-3</sup>	Коефіцієнт пропускання		Пористість	
		Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент
0,2	59,4	0,385	0,383	0,912	0,925
0,2	63,3	0,362	0,371	0,913	0,922
0,2	149,2	0,075	0,078	0,794	0,814
0,2	151,3	0,066	0,065	0,794	0,809
0,2	181,6	0,048	0,051	0,753	0,775
0,2	181,2	0,038	0,043	0,753	0,779
0,2	286,8	0,014	0,012	0,603	0,621
0,2	317,6	0,006	0,007	0,568	0,610
0,2	319,1	0,005	0,007	0,566	0,625

Отже, запропонована статистична модель пористого матеріалу з волокнистою структурою з похибкою не більше 6 % при  $\Theta \geq 0,7$  описує пористість  $\Theta$  і оптичний коефіцієнт пропускання  $T$  листового волокнистого матеріалу як функцію геометричних розмірів волокон — діаметра  $d$  і довжини  $l$ , товщини аркуша  $h$ , середньої щільності  $\lambda$  геометричних центрів волокон. Встановлена функціональна залежність  $f = (h, T)$  дозволяє визначити пористість тонких аркушів волокнистого матеріалу завдяки виміру його оптичного коефіцієнта пропускання.

Таким чином досягається можлива точність виготовлення деталей механічною обробкою з різних матеріалів.

### § 3.5. Оптичний контроль якості пластин

Промислові лазерні вимірювальні системи дозволяють проводити безконтактні вимірювання товщини різних матеріалів (листів, протяжного полотна і т.п.) в процесі виробництва безпосередньо у виробничій лінії з високою точністю, як було показано вище.

#### § 3.5.1. Контроль товщини пластини

Товщина напівпровідникових пластин вимірюється у виробництві після різання злитка на пластини, при шліфовці робочої та неробочої поверхонь пластин і після їх поліровки. Вимірювання можуть виконуватися як контактним, так і безконтактним способом. Серед засобів контактних вимірювань найбільше розповсюдження мають багатооборотні індикатори годинникового типу, що перетворюють лінійне переміщення щупа в обертальний рух стрілки, — покажчика. Характерним прикладом приладів даного типу є зубчата для важеля вимірювальна голівка 1 МИГ, що має діапазон вимірювань до 1 мм, ціну ділення 0,001 мм, похибка вимірювань не більше 3 мкм і вимірювальне зусилля  $200^{+80}$  сН. Недоліки індикаторів годинникового типу полягають в трудності автоматизації процесу вимірювань і в порівняно великому вимірювальному зусиллі, що приводить або до швидкого зносу вимірювального наконечника, або при використанні корундових наконечників до створення подряпин і проколів на поверхні вимірюваної пластини. Від першого недоліку вільні контактні індикатори з головками, індуктивного і фотоелектричного типу електроконтакта.

З їх допомогою завдання автоматизації вимірювань може бути успішно вирішено. Що ж до другого недоліку, то він повністю не усувається. Значно меншим вимірювальним зусиллям біля (5–10) сН володіють прилади індуктивного типу. Проте навіть при таких зусиллях не виключена поява подряпин на поверхні вимірюваних пластин. Окрім цього, для приладів з рухомим щупом необхідне періодичне коригування положення нуля.

Неруйнуючі і неконтактні засоби вимірювань отримують останніми роками особливо бурхливий розвиток. Серед засобів, придатних для вимірювання товщини пластин в цехових умовах, слід виділити пневматичні, оптичні, ємнісні і ультразвукові. Перші два вимагають для проведення вимірювань деякої базової площини, на яку повинна бути покладена вимірювана пластина. Інші дозволяють проводити вимірювання на зразках, що знаходяться в зваженому стані.

Оптичні вимірювачі товщини пластини, на відміну від пневматичних, не містять механічних контактів в пристрої автоматики, мають високу швидкодію, безшумні. На рис. 3.37 проілюстрований найбільш простий метод вимірювання товщини (осьової дистанції) оптичним способом.



Паралельний пучок світла, що випромінюється лазером або іншим джерелом, падає на поверхню пластини, і, дзеркально відбиваючись, минає об'єктив О. Прилад вважається працездатним, якщо поверхня, може розсіювати випромінювання в точці падіння проміння. В цьому випадку зміна рівня поверхні по відношенню до деякого «опорного» рівня, приводить до зміни положення зображення точки, що світиться, в площині лінійного фотоприймача. Даний метод дозволяє визначати положення поверхні пластини щодо опорного рівня відліку з похибкою не гірше  $\pm 5$  мкм при коливаннях товщини на  $\pm 0,25$  мм [3.18]. Як лінійний фотоприймач може бути використана фотодіодна лінійка або ПЗЗ-фотоприймач.

Для збільшення точності вимірювань координатно-чутливий фотоприймач повинен бути зведений з приладом обробки інформації, що визначає положення центру світлової плями на лінійці фотоприймача і його зсув при змінах товщини пластини. Описаний метод вимірювання придатний для контролю товщини пластин, якщо ординати мікрогеометричного профілю поверхні більше довжини хвилі падаючого випромінювання або є величинами приблизно одного порядку.

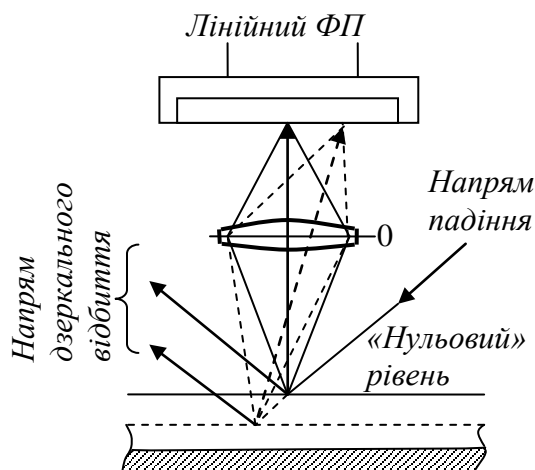


Рис. 3.37. Вимірювання осової дистанції методом оптичної триангуляції

При використанні як джерело випромінювання гелій-неонового лазера ( $\lambda=0,6328$  мкм) дана умова виконується до 10-го класу чистоти поверхні ( $R_z \leq 0,8$  мкм). Отже, для того, щоб проконтролювати описаним методом товщину пластини після операції поліровки ( $R_z \leq 0,05$  мкм), необхідно перевернути її робочу поверхню у бік базової площини і вимірювати по віддзеркаленню випромінювання від неробочої поверхні.

Інший метод (рис. 3.38) вільний від вказаного недоліку. В цілях досягнення найбільш високої точності вимірювань в пристрої застосовано два фотоприймачі:  $\Phi 1$  і  $\Phi 2$ . Зондуєчий пучок світла формується телескопічною

оптичною системою, освіченою лінзою  $L$  і об'єктивом  $O$ . Ход променів від джерела світла  $BC$  до поверхні пластини на рисунку не показаний.

Коли поверхня пластини знаходиться на опорному рівні  $\Delta x=0$ , сигнали  $U1$  і  $U2$  від двох фотоприймачів рівні. Якщо поверхня пластини зміщена в осьовому напрямі на  $\Delta x$ , площа, в якій об'єktiv буде зображення отвору діафрагми  $D3$ , зміщується на відстань  $x$ , що дорівнює  $\Gamma \Delta x$ , де  $\Gamma$  – збільшення оптичної системи. При цьому частка потужності, що приходить на приймач  $\Phi1$  через отвір діафрагми  $D1$ , зменшується і, навпаки, частка потужності, що відбивається від світлоділильної пластини  $СП$  і приходить на приймач  $\Phi2$  через отвір діафрагми  $D2$ , збільшується. Вимірювання здійснюється шляхом аналізу як сумарного сигналу обох фотоприймачів, так і їх різниці. У другому випадку відбувається не тільки вимірювання абсолютної величини відхилення товщини від номінала, але і дається знак відхилення.

Для отримання симетричних характеристик фотоприймачі розташовані симетрично на відстані  $U$  від площин, оптично зв'язаних з опорним рівнем  $\Delta x=0$ . При добре відполірованій поверхні розділення складає 1 мкм на 0,1 мм зсуву рівня [3.18]. Стиковка приладу з мікропроцесорним пристроєм обробки і виведення інформації дозволяє ще більш підвищити точність і розширити діапазон вимірювань завдяки введенню вагових коефіцієнтів, що враховують нелінійність характеристики, приведеної на рис. 3.38.

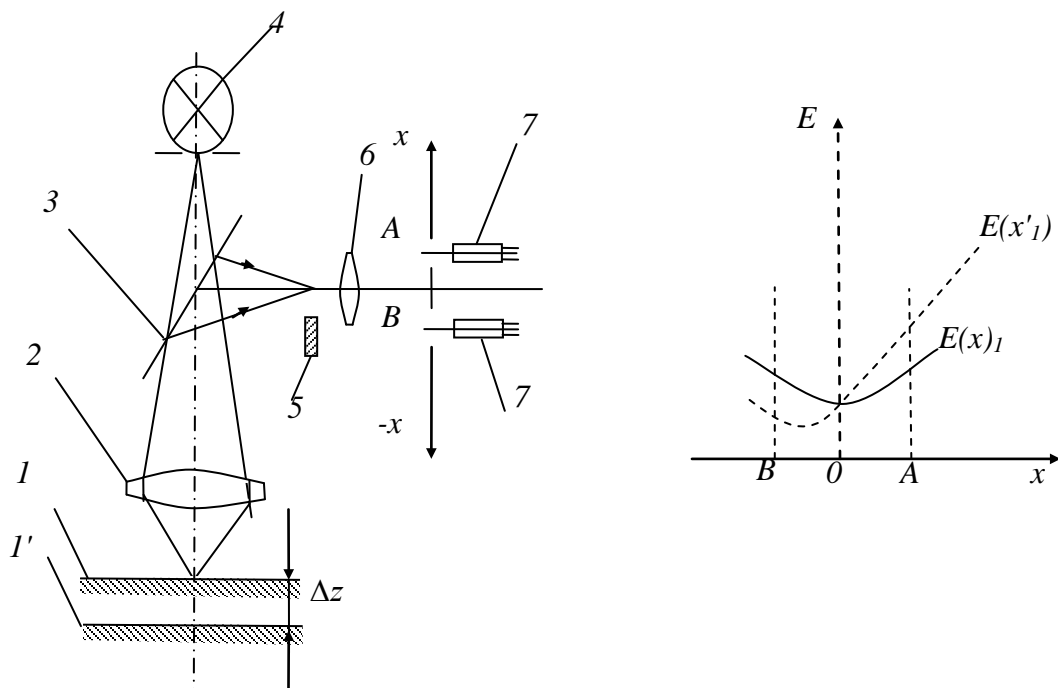


Рис. 3.38. Оптична схема профілометра з ножом Фуко (а) та розподіл освітленості фотоприймача (б): 1, 1' – досліджувана поверхня при точному та неточному настроюванні, 2 – об'єktiv, 3 – світлоділильна пластина, 4 – джерело випромінювання, 5 – ніж Фуко, 6 – лінза, 7 – фотоприймач

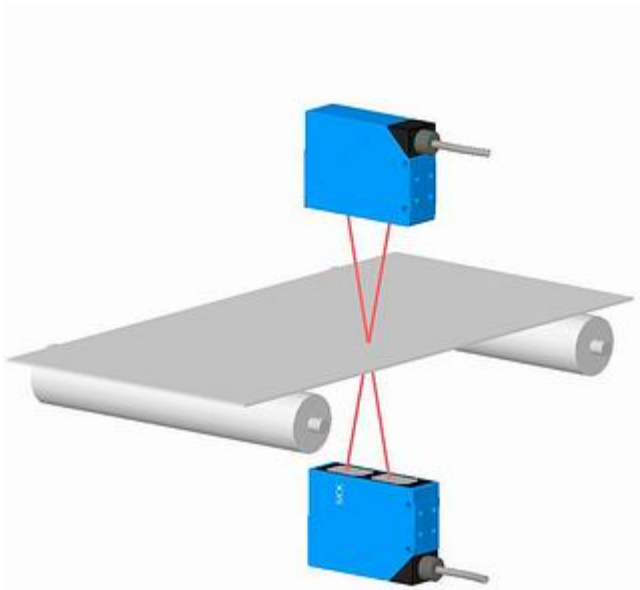


Рис. 3.39. Схема вимірювання товщин деталі у виробничих умовах оптичним методом

Вимірювання проводиться безконтактно, за допомогою цифрових лазерних чутників (мікрометрів), встановлених з обох боків вимірюваного листа (рис. 3.39). Це дозволяє виключити помилки базування і підвищити точність вимірювання. Широкий вибір моделей чутників забезпечує необхідну точність на різних діапазонах вимірювань.

Програмне забезпечення виконує обробку отриманих даних, зокрема: калібрування, перехід до реального масштабу координат, прив'язку системи координат до об'єкту, та ін.

Переваги: забезпечується 100% контроль товщини на кожній ділянці виробництва, виключається «людський чинник», контроль товщини в реальному масштабі часу дозволяє своєчасно внести коректування до технологічного процесу і виключити брак, висока точність, інтеграція в існуючі виробничі лінії, АСК ТП і MES.

Додаткові можливості: інтеграція лазерних вимірювачів з приводами і системами управління рухом, лазерні вимірювальні пристрої можуть встановлюватися безпосередньо після протяжних (прокатних) валів, що забезпечує миттєвий зворотний зв'язок у виробничому процесі.

Прикладами використання можуть бути вимірювання товщини прокатного листа в кольоровій металургії

Як при оптичному методі вимірювань, так і при використанні описаних раніше пневматичних вимірювачів необхідно забезпечувати надійне прилягання пластини, що вимірюється до базової площини. На практиці ця умова виконується за рахунок застосування вакуумного притиску. Висока точність оптичного методу вимірювання осьової дистанції дозволяє сумістити в межах однієї вимірювальної установки операції контролю товщини і прогину. Для цього базова площина замінюється автоматизованим координатним столом,

який переміщає пластини за певною програмою в двох режимах: з вакумним притиском і без нього. Відмітимо, проте, що даний спосіб контролю прогину не дає точних відомостей про його форму через нерівномірне прилягання країв пластини до базової площини.

Закруглення краю напівпровідникової пластини (фаска) потрібне для запобігання тріщин при транспортуванні і обробці пластин. Частинки, що утворюються при сколах, створюють подряпини і інші поверхневі дефекти, а також можуть бути причиною браку при експонуванні топологічного рисунка деталі. Контроль профілю фаски переважно ведеться рухомим механічним щупом, пов'язаним з механотронним перетворювачем. Вертикальні переміщення щупа перетворюються за допомогою механотрона в зміну вихідного електричного сигналу, що реєструється на стрічці самописця [45].

Для вимірювання профілю фаски контактним способом можуть бути застосовані типові профілографи, що використовуються при контролі шорсткості. Недоліком даного методу вимірювань є його низька продуктивність, не подолання навіть при автоматизації аналізу отримуваних форм профілю.

У [46] описується безконтактний прилад для контролю профілю фаски (рис. 3.40). Даний прилад призначений для візуального контролю, проте при використанні матричного фотоприймача або телевізійної передавальної трубки контроль може бути автоматизований. Застосування лазерного проектора зумовлено необхідністю забезпечення великої глибини різкості при лінійному збільшенні оптичної системи понад  $50\times$ . У приладі використовується многомодовий гелій-неоновий лазер ЛГН-105 (0,6328 мкм) або будь-який інший газовий лазер, що працює у видимому діапазоні довжин хвиль.

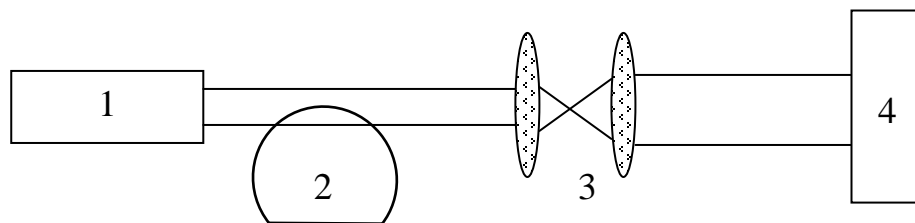


Рис. 3.40. Оптична схема приладу контролю фаски: 1 – лазер, 2 – деталь, яку контролюють, 3 – оптична схема, 4 – екран або фотоприймач

### § 3.5.2. Контроль дефектів пластин

Контроль якості поверхні пластин передбачений на всіх етапах механічної обробки, починаючи з шліфовки робочої і неробочої поверхонь аж до полірування суперфініша і хімічної обробки перед дифузією та епітаксією.

У вітчизняній і в зарубіжній практиці ця контрольно-вимірювальна операція мало автоматизована. Переважає візуальний контроль чистоти поверхні або її спостереження за допомогою стереоскопічних або металографічних мікроскопів.

При візуальному контролі оператор не завжди в змозі оцінити розміри дефектів і їх характер (сколи, тріщини, чужорідні включення в матеріал, залишки абразиву, порошинки, волокна, комплекси продуктів хімічних реакцій). При мікроскопічному контролі проходження всієї пластини веде до великих витрат робочого часу. З цієї причини про стан поверхні судять по вимірюваннях в декількох невеликих зонах, наприклад в п'яти.

Підрахунок дефектів ведеться при косому освітленні за допомогою металографічного мікроскопа в центрі пластини і в чотирьох зонах по краях не ближче ніж 3 мм від краю. При 200-кратному збільшенні мікроскопа площа, що проглядається, складає близько  $0,25 \text{ мм}^2$ . Очевидно, що такий спосіб контролю не ефективний.

Однією з перших промислових установок, призначених для автоматизованого пошуку дефектів поверхневої обробки пластин є система FLAWS (Focused Line Automatic Wafer Scanner) [3.20]. Дана система вигідно відрізняється підвищеною швидкістю від більш ранніх систем, що використовують розсіювання лазерного пучка при його віддзеркаленні від поверхні, що має оптичну неоднорідність. У цих системах промінь лазера обходить поверхню пластини внаслідок відрядкової або спіральної розгортки, що пов'язано з великою втратою часу.

У системі FLAWS лазерний промінь (рис. 3.41) фокусується за допомогою циліндрової лінзи *ЛІ* і утворює на поверхні досліджуваної пластини лінію, що світиться. Потік, відбитий від поверхні, що досліджується проходить через об'єктив *ОІ* і створює в площині лінійного фотоприймача *ФП* зображення радіальної ділянки пластини.

Екран *Е*, розташований між об'єктивом *ОІ* і фотоприймачем *ФП*, служить для захисту *ФП* від дзеркально-відбитого пучка. Якщо поверхня пластини ідеально гладка, то розсіювання відсутнє і сигналу на виході *ФП* немає. При дефекті виникає розсіювання випромінювання, що приводить до засвічення *ФП* і появи сигналу на його виході.

Аналіз сигналів, що знімаються з *ФП*, дозволяє встановити не тільки місце локалізації дефекту, але і його природу. При використанні фотодіодної лінійки, що має 1024 елементи розміром  $25 \times 25 \text{ мкм}$ , і при тактовій частоті схеми прочитування сигналу 2 МГц час обстеження однієї пластини діаметром 75 мм складало 5 с, а розмір мінімального дефекту, що можна виявити – 10 мкм.

У приладі застосований гелій-неоновий лазер ( $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$ ) потужністю 15 мВт.

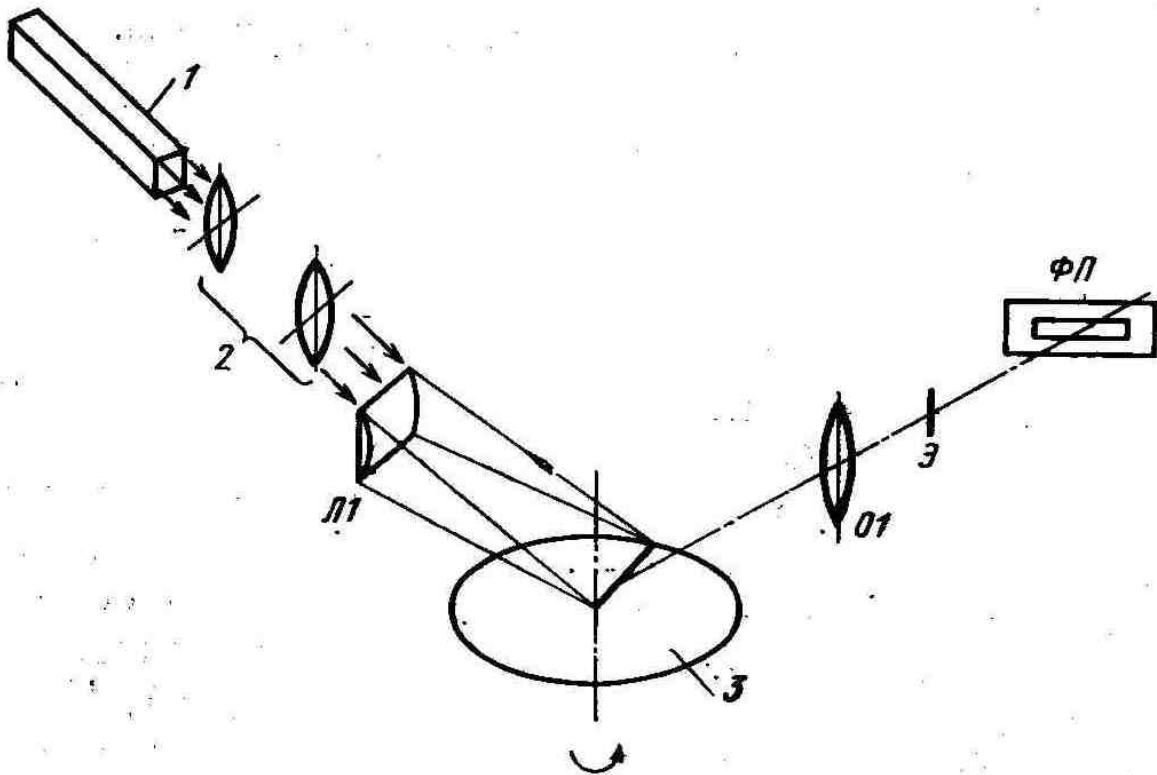


Рис. 3.41. Оптична схема системи FLAWS для контролю стану поверхні пластин: 1 – лазер; 2 – розширювач пучка; 3 – досліджуваний зразок

При необхідності роздільна здатність приладу може бути доведена до одиниць мікрометрів внаслідок створення за допомогою *01* більш збільшеного зображення радіального елемента пластини.

Як видно з приведенного рисунка, екран *E* грає роль не звичайної тіньової маски, що затуляє частину зображення, а виконує функцію просторового фільтру. Тому його положення в оптичній схемі визначається фокусною відстанню об'єктиву *01* і задається з великою точністю. Якщо положення поверхневого дефекту реєструється в описуваній системі на кількісному рівні, то характер дефекту може бути визначений лише якісно, по інтенсивності і виду розсіяння випромінювання на дефектній ділянці.

Відмічено, що дефекти типу чужорідних частинок і подряпин сприймаються як дифузно-випромінюючі об'єкти, що створюють характерний розподіл опроміненості однієї з ділянок лінійного фотоприймача. Даний вид дефектів характеризується невеликою інтенсивністю сигналу. Значно велику опроміненість фотоприймача створюють дефекти, викликані неплоскінністю поверхні пластини.

Описаним рефлексометричним способом вдається виявити не тільки поверхневі дефекти, але і дефекти, що знаходяться в приповерхневому шарі.

Згідно [3.21] промінь гелій-неонового лазера ( $\lambda = 0,6328$  мкм) не тільки відбивається від поверхні кремнієвої пластини, але і проникає вглиб її, що дозволяє виявити дефекти на глибині до 500 нм.

В описаному приладі для візуалізації дефектів застосований графічний дисплей, що зображає карту розсіювання з кольоровим кодуванням відбивної здатності по двох координатах.

Рефлексометричний метод виявлення дефектів не дає інформації про їх глибину або висоту. Тим часом для здійснення доведення забракованих пластин необхідно мати в своєму розпорядженні чисельні дані про розміри дефектів. Одиночні дефекти можуть бути виміряні шляхом профілометрії. Для оцінки розміру множинних дефектів найбільш придатні методи інтерферометрії.

Основним приладом, що використовує інтерферометричний принцип при вимірюваннях висоти, глибини, профілю і товщини плівок, є широко відомий мікроінтерферометр Лінника МІІ-4, що є поєднанням інтерферометра Майкельсона з оптичним мікроскопом.

Історично інтерферометричні вимірювання відносяться до категорії лабораторних методів, мало придатних для цехових умов через низьку продуктивність. Наразі цей недолік успішно долається завдяки застосування фотоелектричних приймачів і автоматизованих засобів обробки інтерферограмм.

Прикладом є прилад, що розроблений для контролю стану поверхні магнітних дисків, дозволяє автоматично виявляти дефекти порядку 1 мкм і придатний для багатьох інших цілей, зокрема для контролю якості поверхонь пластин [3.22].

У основу приладу (рис. 3.42) покладена різновид оптичної схеми мікроінтерферометра Лінника (див. § 2.4.4), в яку введено дві лінзи, призначені для збільшення розміру зображення. Опорне дзеркало може встановлюватися під різними кутами  $\alpha$ . При  $\alpha=0$  інтерференційних смуг в площині фотоприймача не спостерігається.

Із збільшенням  $\alpha$  число інтерференційних смуг, що створюються у полі зору фотоприймача, зростає. Якщо досліджувана поверхня абсолютно плоска і не містить дефектів, інтерференційні смуги паралельні.

Локальний дефект викликає викривлення однієї або декількох інтерференційних смуг. Викривлення на одну відстань між смугами відповідає глибині або висоті дефекту, рівною  $X/2$ .

На рис. 3.43 приведений фрагмент інтерференційної картини поверхні, що містить подряпину завглибшки 0,5 і шириною 50 мкм.

Картина отримана в монохроматичному світлі на довжині хвилі 546 нм. Для створення достатнього розділення кут  $\alpha$  встановлюється так, щоб в площині матричного фотоприймача (512x512) знаходилося не більше 10 смуг інтерференція.

Потім ЕОМ опитує фотоприймач по окремих зонах, розміром 64x64 осередки. У середині кожної зони знаходиться найяскравіша і найтемніша

крапка і обчислюється середня яскравість. Крапки мають яскравість вище середньої, заносяться в пам'ять ЕОМ як світлі, а крапки з яскравістю нижче середньої вважаються темними.

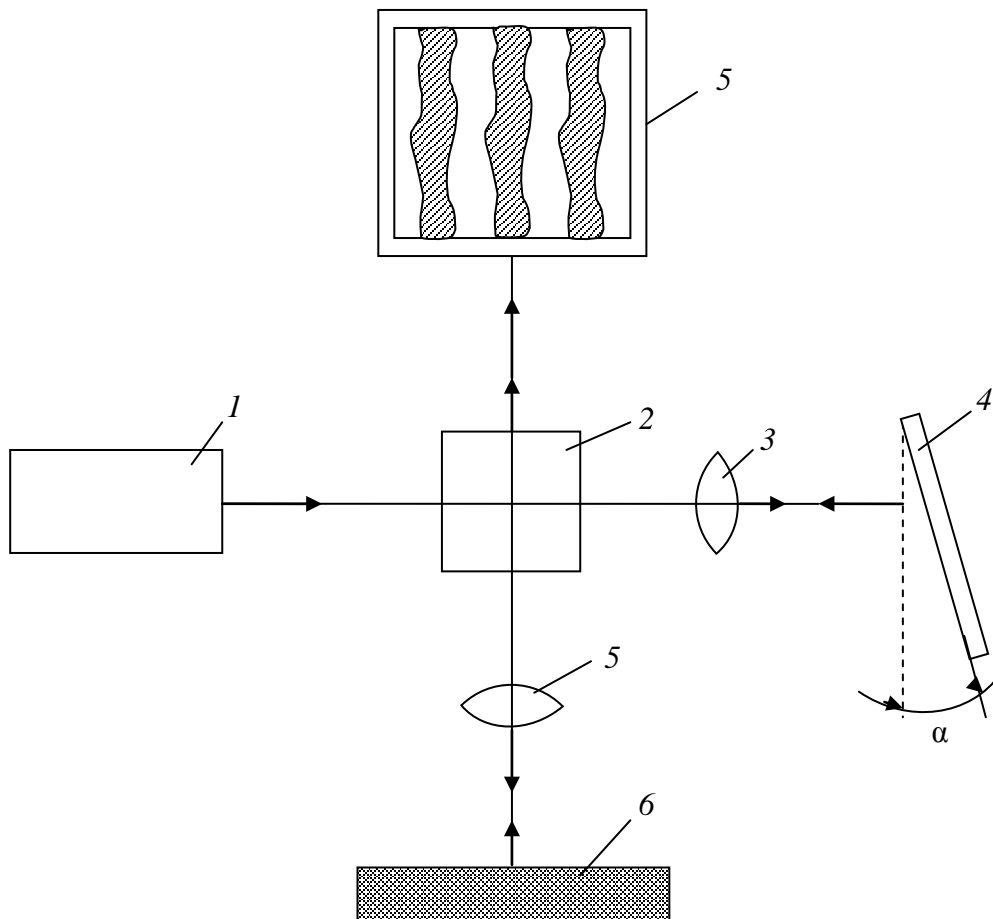


Рис. 3.42. Оптична схема приладу для автоматичного виявлення дефектів на деталях: 1 – монохроматичне джерело; 2 – світлоподілювач; 3 – лінзи; 4 і 5 – опорне дзеркало і матричний фотоприймач; 6 – досліджуваній зразок

Необхідність розбиття всього поля на окремі зони продиктована на різною яскравістю картини в центрі і на краях поля. Для боротьби з оптичними перешкодами ЕОМ фільтрує вищі просторові частоти усередині малих зон, розміром 5x5 осередків. Для виключення впливу тремтіння картини остаточна фільтрація здійснюється по результату п'яти послідовних реєстрацій зображення.

Для чисельної оцінки ступеня нерівності вводиться показник нерівності  $N$  (рис. 3.44). Для його розрахунку шляхом описаних вище прийомів в пам'ять



ЕОМ записується усереднена інтерференційна картина розміром 512X512 крапки (на рис. 3.44 число крапок зменшене до 100).

На підставі цієї реальної картини формується опорна картина. Для цього стовпці, що містять більше 50% крапок одного типу (чорних або білих), цілком вважаються відповідно чорними (Ч) або білими (Б).



Рис. 3.43. Фрагмент інтерференційної картини від поверхні, містять подряпину глибиною 0,5 мкм і шириною 50 мкм ( $\lambda=0,546$  мкм)

Показник нерівності розраховується як відношення суми чорних і білих крапок реальної картини, не співпадаючих з кольором відповідних смуг опорної картини, до загального числа крапок зображення в зоні аналізу.

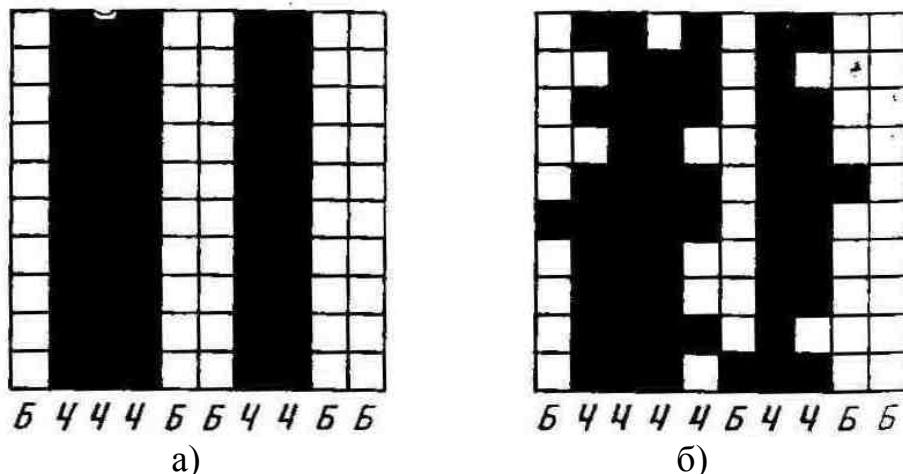


Рис. 3.44. До розрахунку показника нерівності: а – ідеально гладка поверхня ( $N=0$ ); б – поверхня з нерівностями ( $N=12\%$ )

Розглянуті вище принципи виявлення поверхневих дефектів напівпровідникових пластин, засновані на розсіянні лазерного випромінювання і на інтерференції, як і методи, що використовують фотоелектронну емісію і перерозподіл інтенсивності відбитого некогерентного випромінювання, не можуть з достатньою визначеністю детектувати тип дефекту (тріщина, скол, чужорідне тіло тощо).

Уявлення про тип дефекта необхідно в тих випадках, коли є сумнів до питання необхідності доведення пластин або їх бракування.

Для візуалізації дефектів полірованих поверхонь розміром від долей мікрметра при будь-якій їх будові та орієнтації розроблено прилад [3.23], основну частину якого складає широкоапертурний коловий освітлювач темного поля з вбудованим в нього мікроскопом (рис. 3.45).

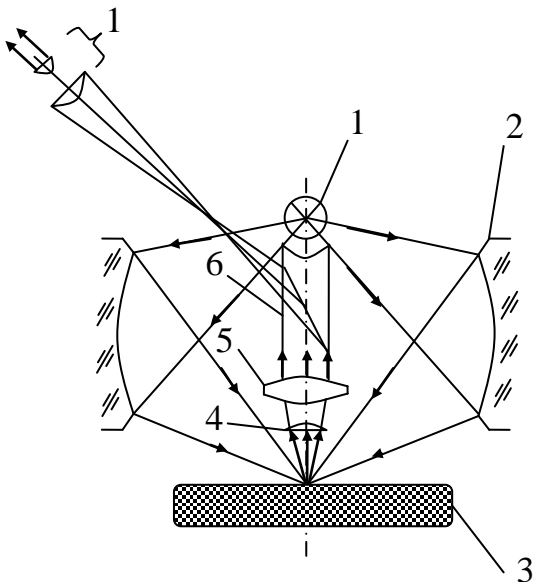


Рис. 3.45. Оптична схема приладу для контролю чистоти полірованих поверхонь: 1 – джерело світла; 2 – круговий відбивач; 3 – досліджувана пластина; 4 – 7 – елементів оптичної системи мікроскопа спостереження

Прилад має великий діапазон кутів падіння променів ( $42\text{--}76^\circ$ ), що освітлюють зону спостереження, кругове освітлення і можливість спостережень в темному полі з різними збільшеннями. Проглядання поверхні проводиться порядково. Для цього робочий стіл має механізми поздовжньої та поперечної подачі.

### § 3.5.3. Контроль неплоскостності і прогину пластин

Виготовлення пластин та інших деталей сучасних радіоелектронних приладів, яке передбачає технологічний процес механічної обробки, необхідно контролювати на фінішній стадії для забезпечення високої якості виробу.

Забезпечення потрібних в сучасних надточних деталях радіоелектронних приладів допусків на несумісність топологічних рисунків менше 0,5 мкм накладає жорсткі обмеження на неплоскостність, наприклад як напівпровідникових пластин, так і пластин фотошаблонів. Ці обмеження обумовлюють максимальне відхилення від площини для стекол фотошаблонів на рівні  $\Delta = 1 - 2$  мкм і для напівпровідникових пластин (близько 3 мкм). Поняття відхилення від заданої площинності встановлене ДСТУ як найбільша відстань від точок реальної поверхні до прилеглої площини в межах нормованої ділянки.

Для фотошаблонів і напівпровідникових пластин нормованою ділянкою є вся поверхня. Неплоскостність скла фотошаблонів зазвичай перевіряється в технологічному циклі одноразово на етапі виготовлення заготовок для подальшого нанесення покриття. Необхідності в повторних перевірках неплоскостності поверхні фотошаблонів немає, оскільки режими їх експлуатації не створюють в них додаткової необоротної внутрішньої напруги та деформацій. Інакше складається ситуація з напівпровідниковими пластинами.

Внаслідок створення на пластинах зон і шарів з різними фізико-хімічними властивостями відбувається їх деформація, що виявляється в появі опуклостей, вогнутостей поверхні або складніших вигинів. Вигини роблять значний вплив на параметри епітаксціальних шарів і діелектричних покриттів і, як наслідок, на електричні параметри і стабільність роботи готового виробу (рис. 3.46) [58].

Для оцінки ступеня вигнутості пластини вводиться висота або стріла прогину  $h$ , вимірювана, на відміну від відхилення від площинної без вакуумного притиску, у вільному стані (рис. 3.47).

Пластини, що мають висоту прогину більше 40–50 мкм, бракуються. Висота прогину повинна контролюватися неодноразово в ході виготовлення ВС, особливо після механічної обробки і високотемпературних операцій, таких як термічне окислення, дифузія і епітаксія.

Зображений на рис. 3.47,б метод визначення висоти прогину стосується найпростішого з вигинів – сферичного.

На практиці зустрічаються складніші форми прогину. Вимірювання прогину ускладнюється ще і тим, що його необхідно проводити не тільки на заготовках напівпровідникових пластин, але і в тих випадках, коли на робочій стороні пластини вже утворені певні технологічні шари.

Вимірювання неплоскостності скляних пластин фотошаблонів проводиться переважно інтерферометричним способом. Цьому сприяє висока чистота поверхні стекол, що дозволяє отримати чітку інтерференційну картину. За допомогою інтерферометра типу ЕМ-679А [3.24] можуть бути виміряні

відхилення від площинної в діапазоні від 0,64 до 3 мкм і від 3 до 15 мкм з похибкою не більш  $\pm 0,64$  мкм.

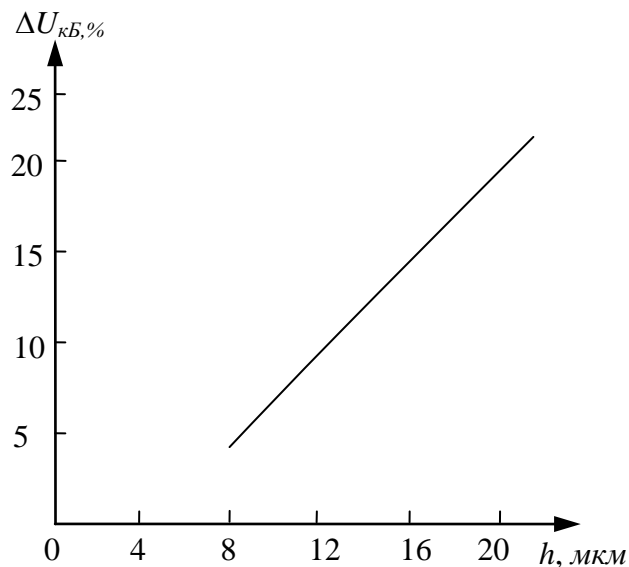


Рис. 3.46. Вплив висоти прогину кремнієвих пластин  $h$  на розкид допустимої напруги колектор — база  $\Delta U_{кБ}$

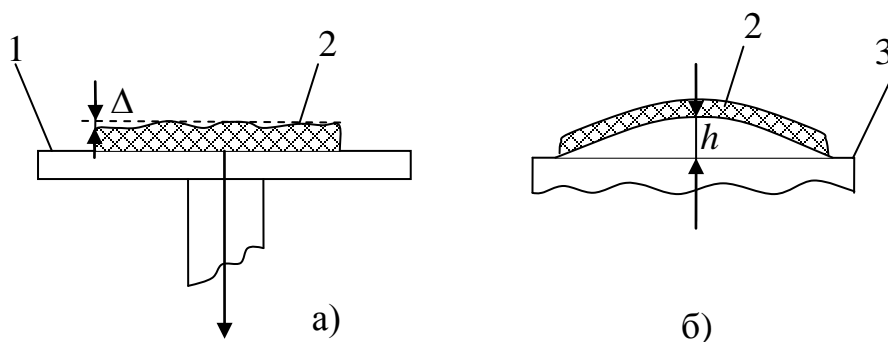


Рис. 3.47. До визначення відхилення від площини  $\Delta$  (а) і висоти прогину  $h$  (б): 1 — стіл з вакуумним притиском; 2 — пластина; 3 — опорний рівень

Інтерференційна картина виводиться на телевізійний екран. Відхилення визначається по числу інтерференційних смуг (кілець) на екрані. Для полегшення рахунку на екрані електрично формується рухомий маркер. Невелике доопрацювання вказаного обладнання задля автоматизації обчислення відхилення від площинної забезпечить широкі можливості для її застосування у виробничій практиці.

Для проведення тонших досліджень неплоскостності може бути рекомендований інтерферометр ИКП-2 [3.25], що має окуляр — мікрометричну систему прочитування з точністю вимірювань не гірше 0,02 ширини інтерференційної смуги.

Залежно від чистоти поверхні напівпровідникових пластин для контролю неплоскостності застосовуються інтерферометричні або профілометричні (контактні і неконтактні) методи.

Потужним засобом для дослідження поверхні полірованих пластин є призматичний інтерферометр (рис. 3.48). З його допомогою можуть бути виміряні неплоскостність, прогин та деякі поверхневі дефекти. Якщо в звичайних інтерферометрах інтервал між двома сусідніми смугами відповідає зсуву рівня досліджуваної площини на  $\Delta h = \lambda/2$ , то в призматичному інтерферометрі за рахунок компенсації різниці ходу робочого і опорного пучків цей інтервал може бути збільшений до десятків довжин хвиль. Для призми, що має кут при вершині  $90^\circ$ , різниця рівнів рельєфу  $\Delta h$ , відповідна відстані між двома сусідніми смугами інтерференції, визначається виразом

$$\Delta h = \lambda/2 \left\{ 1 - n^2 \sin^2 [\pi/4 - \arcsin(\sin \alpha / n)] \right\}^{-1/2}$$

де  $n$  — показник заломлення матеріалу призми;  $\alpha$  — кут падіння пучка на вхідну катетну грань;  $\lambda$  — довжина хвилі.

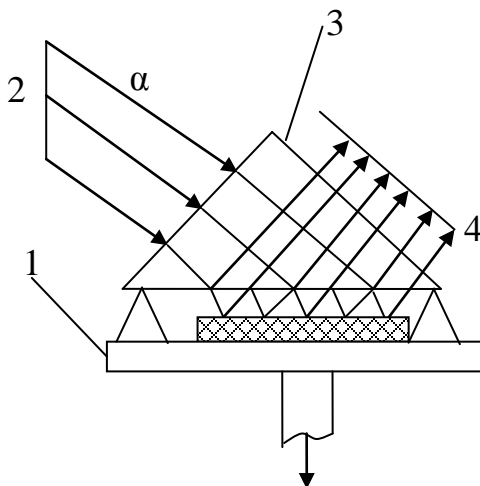


Рис. 3.48. Призмений широкопольний інтерферометр: 1 — стол з вакуумним прижимом, 2 — зондуєчий пучок, 3 — призма, 4 — площа встановлення фотоприймача

Існують прилади, що використовують широкопольний призматичний інтерферометр, які містять у приймальному тракті багатоеlementні фотоприймачі, сигнали яких оброблюються за допомогою ЕОМ. Значення  $\Delta h$  може плавно підстроюватися в межах від 0,5 до 15 мкм. Похибка вимірювань не більш  $\pm 0,25$  мкм.

Після того, як на робочу сторону пластини нанесений топологічний малюнок, застосування інтерферометричних вимірювань ускладнюється.

Необхідність контролю прогину вимушує удаватися в цьому випадку до профілометрування.

Для того, щоб не пошкодити деталь, профілометрування ведеться по неробочій стороні пластини. Пластину встановлюють на точкові корундові опори і проводять вимірювання одночасно з допомогою п'яти індуктивних датчиків, розташованих в ряд. Зазвичай достатнім є один вимір в діаметральному перетині. Якщо прогин має складну форму, то проводиться трасування поверхні із записом отриманого профілю на самописному приладі. Контактні профілометри забезпечують високу точність вимірювання прогинів пластин, що мають товщину більше 0,5 мм.

При тонших пластинах вимірювальне зусилля щупового приладу може стати джерелом додаткової деформації і відповідно додатковій похибці вимірювань. Від даного недоліку в значній мірі вільний прилад, що використовує фотометричний метод вимірювання висоти прогину [3.26].

У цьому приладі контроль здійснюється вимірюванням потоку випромінювання, що пройшло через щілину між поверхнею контрольованої пластини і ребром лекальної лінійки (рис. 3.49).

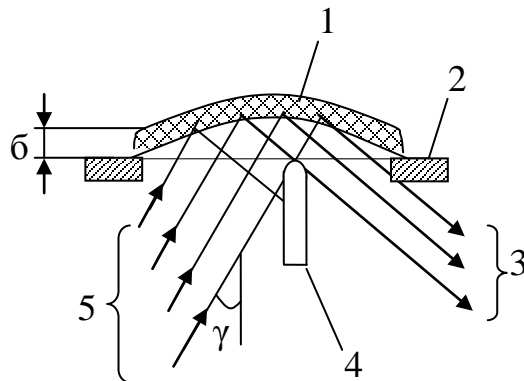


Рис. 3.49. Фотометричний вмірювач прогину: 1 – пластина, яка досліджується, 2 – опорна площина, 3 – вихідний пучок, 4 – лекальна лінійка, 5 – вхідний пучок

Чим більше ширина зазору  $\delta$ , тим більше перетин пучка, що пройшов через зазор і відповідно більше промениста потужність, що приходить на фотоприймач. Оскільки розміри вістря лекальної лінійки не можуть бути нескінченно малими, існує деякий пороговий зазор  $\delta_{\text{під}} = r(1 - \sin \varphi) \sin \varphi$ , при якому ширина вихідного пучка дорівнює нулю ( $r$  – радіус закруглення вістря лекальної лінійки,  $\varphi$  – кут падіння зондуєчого пучка).

При використанні лекальної лінійки ЛД-0-200 нижня межа вимірювань складає менше 10 мкм, що відповідає практичним вимогам при контролі прогинів деталей типу пластини у виробничих умовах.

Для забезпечення достатньої точності вимірювань необхідно, щоб променистий потік відбивався тільки обстежуваною поверхнею і не відбивався від іншого боку пластини. Ця вимога виконується для всіх використовуваних в промисловості напівпровідникових пластин, якщо верхня межа довжин хвиль, що випромінюються джерелом світла, не виходить за межі видимої області. Обмеження спектрального діапазону випромінювання може бути досягнуте внаслідок застосування джерел монохроматичного випромінювання або світлофільтрів з достатньо вузькою смугою пропускання.

Похибка вимірювань приладу тим менше, чим краще якість досліджуваної поверхні. Для типових шорсткостей, відповідних неробочій стороні напівпровідникових пластин, похибка вимірювання прогину не перевищує  $\pm 5\%$ .

Разом з розглянутими прийомами вимірювання прогинів, на низці виробничих підприємств знаходять застосування фотоелектричні методи, які засновані на принципі вимірювання осьової дистанції, а також методи голографічної інтерферометрії, що відрізняються широким діапазоном вимірювань і низькою критичністю до властивостей відбиття досліджуваною поверхнею.

Отже, розглянуті методи вимірювання та контролю розмірів дозволяють у виробничих умовах підвищити якість виготовлення надточних деталей.

### **Перелік посилань до розділу 3**

- 3.1. Фукс-Рабинович Л.И., Епифанов М.В. Оптико-электронные приборы. –Л.: Машиностроение, 1979. -362 с.: ил.
- 3.2. Телешевский В.И., Потапов Б.М. Фотоэлектрический микроскоп с акустооптическим анализатором изображения // ПТЭ. – 1974. - № 3. – С.182- 184.
- 3.3. Мироненко А.Н. Фотоэлектрические измерительные системы. –М.: Энергия, 1967.
- 3.4. Быстров Ю.А., Колгин Е.А., Котлецов Б.Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
- 3.5. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. – Л.: Машиностроение, 1978. – 336 с.
- 3.6.Телешевский В.И. Способ измерения шероховатости поверхности изделий в приборостроении // Эл-ты и приб. с-м измер. и упр. автом. пр-в. - Пенз.ПИ. - Пенза,1992. - С.3-8
- 3.7. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. - М.: Мир, 1978. - 323 с.
- 3.8. Коваль С.Т., Колобродов В.Г. – ОМП, 1976, № 6, с. 6.
- 3.9. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 120 с.
- 3.10. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 385 с.
- 3.11. Косторнов А.Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. – Киев: Техника, 1983.
- 3.12. Косторнов А.Г., Кириченко О.В., Гужва Н.С. Термообработка металлонаполненных целлюлозных войлоков и их прочностные свойства. – // Порошковая металлургия. – 1981. - № 12. - С. 26-30.
- 3.13. Большаков И.А., Ракошиц В.С. Прикладная теория случайных потоков. – М.: Сов. радио, 1978. – 247 с.
- 3.14. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 415 с.
- 3.15. Абакишин Ю.Е., Коваленко Л.Г., Филимонов Р.П. Описание пространственного импульсного поля помех вероятностной моделью составного процесса // Автометрия. – 1975. - № 6. -С. 3-8.
- 3.16. Карлин С. Основы теории случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 535 с.
- 3.17. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. – К.: Вища школа, 1981. – 408 с.
- 3.18. Таланчук П.М., Голубков С.П., Маслов В.П., Борсук П.С., Потырайло Р.А. Лазеры в контрольно измерительной технике. – К.: Техника, 1992. - 365 с.
- 3.18. Pour vos Mesures Dimensionnell es Pensez Optoelectronique // Mesures, regulation, Automatisme. -1980. – N 12. – P.49-51.



- 3.19. Делендик О.М., Юркин О.К. Прибор для контроля фаски // *Электронная промышленность*. – 1984. – Вып. 6(134). – С.62 – 63.
- 3.20. *Controlre d'Elat de Surface: le Laser Remplace l'Qeil* // *Mesures, regulation, Automatisme*. -1981. – N 8/9. – P. 65-67.
- 3.21. Иверсен У.Р. Обнгаружение дефектов под поверхностью полупроводниковых пластин с помощью лазера // *Электроника: Пер. С англ.* – 1984. – Т.57, № 22. – С. 6.
- 3.22. *Elat de Surface: un Controle Automatique par interferometrie* // *Mesures, regulation, Automatisme*. -1984. – N 2. – P. 57-59.
- 3.23. *Опτικο-механические приборы* / Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев В.Н. и др. –М.: Машиностроение, 1984. – С.72-75.
- 3.24. Завин И.Е. и др. Установка ЭМ-679А для контроля плоскостности // *Электронная промышленность*. – 1981. – Вып. 7. - № 8(103-104). – С. 85 – 88.
- 3.25. Елисеев Ю.В. и др. Интерферометр для контроля плоскостности ИКП-2 // *Опτικο-механическая промышленность*. – 1981. - № 6. – С.50.
- 3.26. Захаров Н.П., Никифорова С.И., Бочкин О.И. Погрешности измерения прогибов кремниевых пластин фотоэлектрическим способом // *Электронная техника*. – 1979. – Сер. 7. – Вып. 2(93). – С. 79-83.

## **РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ОПТИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ У НАДТОЧНОМУ КОНТРОЛІ РОЗМІРІВ**

Перспективним напрямом підвищення точності та надійності контролю виробів телевізійними методами є перехід на застосування принципово нових напівпровідникових чутників зображень на основі приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) [4.1]. Твердотільні аналоги вакуумних телевізійних трубок на основі матричних ПЗЗ-структур усувають геометричні спотворення, нелінійність розгортки, підвищують стабільність роботи.

Найважливішою перевагою лінійних та матричних ПЗЗ-чутників зображення для вимірювальних систем є простота оптичної дискретизації зображення, яка представляє контрольований розмір числом відеоімпульсів, визначуваним числом освітлених елементів ПЗЗ-структур і не залежним від різних дестабілізуючих чинників. Крім того, твердотільні чутники зображень забезпечують високу точність вимірювань у широкому діапазоні вимірювань освітленості завдяки стабілізації амплітуди відеосигналу при зміні часу накопичення заряду.

Автоматизація контролю та надточних вимірювань параметрів деталей оптичними приладами під час технологічного процесу виготовлення без використання ПЗЗ-чутників практично не є можливою.

### **§ 4.1. Основні засади автоматизації оптичних вимірювань**

Дослідження систем автоматизованого контролю геометричних розмірів об'єктів з використанням чутників зображення на ПЗЗ показали, що навіть при використанні неспеціалізованих стандартних об'єктивів з роздільною здатністю  $R \approx 50$  лін/мм межа елементу у відеосигналі розмивається на 2–3 біта [4.2]. Елемент з контрастністю  $K=0,3$  (рівень корисного сигналу в 2 рази перевищує фон) може бути виміряний з абсолютною похибкою  $\pm 2$  біт. Наприклад, при використанні лінійного ПЗЗ фотоприймача на 1000 біт це забезпечує похибку близько 0,2%, тоді як похибка контролю з використанням вакуумних телевізійних трубок складає 1–2% від скануемого розміру. Враховуючи компактність багатоелементних фотоприймачів, їх конструктивну міцність, надійність в роботі, низьку напругу живлення та інші переваги, застосування в системах виробничого контролю виробів електронної техніки є перспективним.

Наразі розроблені та серійно випускаються моделі автоматизованих телевізійних вимірювальних мікроскопів, котрі можуть бути з успіхом використані при виробничому контролі виробів мікроелектроніки. Найбільш досконалими з них є: Latimet, MPA-2A та Latimet Automatic (Leitz, ФРН), System, 80, System, 801, Mod. 158 (ITP, США), Nanoline (Nanometrics, США), матриці OV6630, OV6130 з розміром пікселя  $9 \times 8,2$  мкм (OmniTechnologies, США), MSA (Opton, ФРН) тощо.

Для контролю виробів мікроелектроніки представляють зацікавленість й телевізійні мікроскопи, в яких сканування оптичного променя відбувається шляхом строчно-кадрової розгортки від неперервного світлового випромінювання, наприклад, лазера. Застосування в якості джерела лазера телевізійного мікроскопа наведена на рис. 4.1.

Растр на об'єкті 7 контролю створюється за допомогою дзеркал 2 та 4, що коливаються в двох взаємно перпендикулярних напрямках). Струм на виході фотоприймача 10 (ФЕП) складається корисного сигналу та шумів.

Світловий потік, що проходить в даній схемі до фотоприймача, визначається відомим співвідношенням

$$F = \pi \tau_c \tau_0 A_{\text{об}}^2 \aleph^2 B S, \quad (4.1)$$

де  $A_{\text{об}}$  - числова апертура об'єктиву;

$\tau_c \tau_0$  - коефіцієнти пропускання оптичної системи та об'єкта, що досліджується відповідно;

$B$  - променистість джерела, Вт/(см<sup>2</sup>·стерадіан);

$S$  - площа поверхні, що випромінює, см<sup>2</sup>;

$\aleph = d / D$  - коефіцієнт зменшення зображення поверхні, що випромінює;

$d$  - діаметр світлової плями в площині об'єкта;

$D$  - діаметр випромінювача.

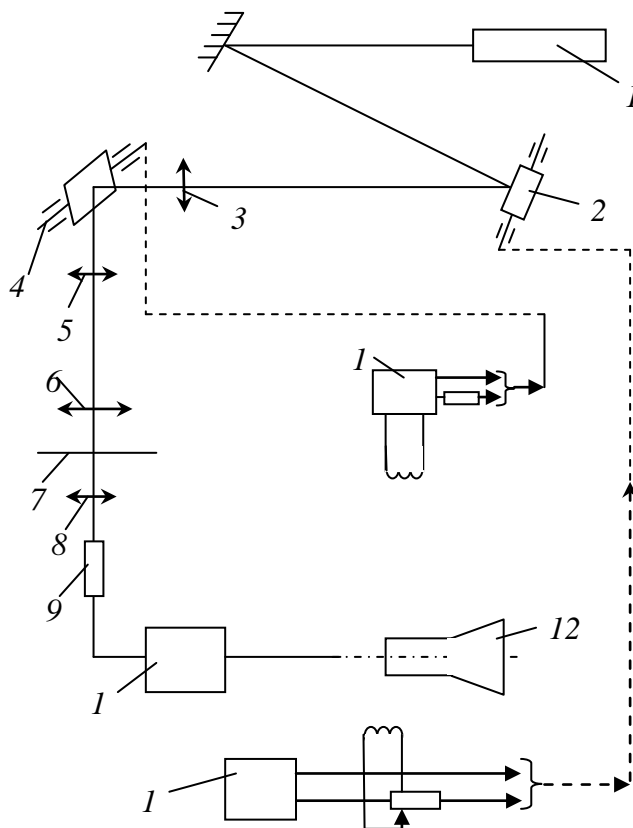


Рис. 4.1. Принципова схема телевізійного мікроскопу із скануванням лазерним променем: 1 – лазер; 2 та 4 – скануючі кадрове та рядкове дзеркала; 3 – лінза, що проєктує зображення кадрового дзеркала на рядкове; 5 – об'єктив, що проєктує зображення дзеркал на площину зрачка об'єктива мікроскопа; 6 – об'єктив мікроскопа; 7 – площина об'єкта; 8 – конденсор; 9 – фотоприймач; 10 – блок підсилювача сигналу; 11 – блок кадрової розгортки телевізора, з'єднаний з дзеркалом 2; 12 – кінескоп; 13 – блок рядкової розгортки телевізора, з'єднаний з дзеркалом 4

Відеосигнал з ФЕП підсилюється, коригується та надходить на модулятор кінескопу телевізора, де формується із збільшенням, пропорційним відношенню довжин рядків в електронному та оптичному растрах.

Часто недоліком подібних схем освітлення є мале відношення сигнал-шум. У [4.3] відзначається, що незадовільне відношення сигнал-шум органічно властиво телевізійним скануючим мікроскопам, що використовують звичайні джерела світлоламп розжарювання, дугові лампи, електронно-променеві трубки тощо.

Основний внесок в шуми відеосигналу вносить струм ефекту дробу до ФЕП, а рівень шуму  $\alpha$  визначається формулою:

$$\alpha = 12e\Delta f/s\tau\lambda^2 B, \quad (4.2)$$

де  $e$  – заряд електрона;

$\Delta f$  – смуга частот відеосигналу;

$s$  – інтегральна чутливість фотокатода ФЕУ;

$\lambda$  – довжина хвилі світлового випромінювання;

$\tau = \tau_c \tau_0$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи з урахуванням об'єкту.

Для забезпечення параметрів, що задовольняють вимогам, що пред'являються, з урахуванням можливих характеристик ( $\Delta f \approx 3 \cdot 10^6$  Гц;  $\tau \leq 0,01$ ;  $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$  см:  $\alpha=0,02$ ,  $s = 0,01$  А/Вт), необхідно, щоб променистість джерела світла була не нижча  $B = 3,6 \cdot 10^4$  Вт/(см<sup>2</sup>·стерадіан), тобто потрібен випромінювач з радіаційною температурою не нижче 9000 К. Таким джерелом є тільки лазер, що і вимагає його використання в приладах подібного типу. Лазерний телевізійний мікроскоп забезпечує розділювання по відстані між лініями близько 0,3 мкм, координатні спотворення по всьому полю менше 1% і фіксує зсуви меж елементів об'єкту до 0,05 мкм.

Наразі поширені лазерні телевізійні мікроскопи, які призначені для використання в технології мікроелектроніки. Прикладом є лазерний скануючий телевізійний мікроскоп моделі LSM (Opton, ФРН). Мікроскоп дозволяє здійснювати спостереження на екрані кольорового дисплея з регульованим кольорним контрастом як звичайного зображення, що утворюється розсіяним на об'єкті світлом, так і зображення, що є результатом збуджень, що вносяться інтенсивним лазерним випромінюванням, і що несе інформацію про стан напівпровідникових структур, потенційно ненадійних зонах, областей з різним ступенем збудження носіїв. Оптико-електронна система мікроскопа дозволяє досягти достатньо великих збільшень біля  $8000^x$  і більш з восьмикратним електронним збільшенням, що плавно змінюється.

Лазерний телевізійний мікроскоп може бути легко автоматизованим і пристосованим для мікроспектрофотометрування, рефлексометрії і вимірювань абсорбції в планарній технології.

Останні досягнення в розробці лазерів з перенастроюваною довжиною хвилі дозволяють створити достатньо прості, зручні для виробничого контролю скануючі лазерні телевізійні мікроскопи. Такі прилади, зокрема, дають

можливість фіксувати та вимірювати різні напівпровідникові елементи і структури по їх відмінностях у відбивній і поглинаючій здібностях в деякому діапазоні довжин хвиль аж до короткохвильової області спектру з  $\lambda = 0,2\text{--}0,3$  мкм, де розділювальна здатність таких мікроскопів достатньо висока і забезпечить контроль мікронних і субмікронних структур.

Телевізійні методи у виробництві значно розширюють можливості контролю і вимірів, наприклад, дозволяють регулювати в широких межах контраст і яскравість зображення, досить просто працювати з позитивним або негативним зображенням. Телевізійні фотоелектричні вимірювальні системи легко піддаються автоматизації та узгоджуються з ЕОМ, зокрема спеціалізованими. Телевізійні системи дозволяють не тільки проводити високоточні вимірювання ширини окремих елементів з високою продуктивністю, але й оперативно обробляти мікрозображення за групами параметрів. Наприклад, вимірювати розміри проекції елементів по координатах  $x$  і  $y$ , їх площа, периметр, координати центру ваги фігур, коефіцієнт форми – відношення квадрата периметра до площі. Це надає можливості характеризувати форму дефектів, і за цією ознакою знайти причину їх виникнення: визначити інтегральну спрямованість (переважаючу орієнтацію) будь-яких структур, зокрема дефектів у зображенні, що також дає можливість провести їх ідентифікацію; групувати елементи за різними ознаками, тобто проводити детальний якісний та кількісний аналіз геометрії мікрозображень. Телевізійні методи контролю і вимірювань є незамінними особливо при розробці і освоєнні найбільш складних технологічних процесів мікроелектроніки. Йдеться про спеціалізовані телевізійні аналізатори зображень (ТАЗ), що базуються на принципах телевізійної автоматики. Такі аналізатори є одними з найбільш перспективних засобів кількісного аналізу мікрозображень, що дозволяють повністю автоматизувати процес вимірювань, виключити суб'єктивні помилки оператора і забезпечити високу продуктивність контролю.

До теперішнього часу існували і серійно випускалися в основному неспеціалізовані ТАЗ широкого призначення, придатні лише для дослідницьких цілей, де не потрібна оперативність, необхідна для виробничого контролю. Типовими приладами цього класу є Quantimet-720 (Великобританія); iMicrovideomat і Leitz Classimat (ФРН) [4.2]. В основі роботи цих приладів лежать принципи телевізійної автоматики, що полягають в тому, що аналоговий відеосигнал зі сканованого зображення перетворюється в цифрову форму відповідно до обраних градацій рівня сигналу. Внаслідок цього відбувається цифрове детектування (виділення) об'єктів з різними оптичними характеристиками, наприклад елементів або дефектів мікрооб'єктів складної форми. Крім того, проводиться дискретизація зображення, тобто розбиття його на квадрати, розмір яких визначається виходячи з необхідної роздільної здатності. Мікрозображення (об'єкт) представляється у вигляді бінарного дискретизованого сигналу, що легко обробляється різними цифровими

обчислювальними засобами, тобто здійснюється автоматизація процесу вимірювання та контролю об'єктів.

Слід зазначити, якщо мета досить проста, наприклад для обробки окремих об'єктів простої форми, можливе використання і універсальних ЕОМ. Проте для надточних об'єктів складної форми та малих габаритів, для аналізу їх зображення, визначення та вимірювання дефектів, статистичного аналізу геометричних параметрів (в разі необхідності) навіть швидкодіючі ЕОМ не забезпечують необхідні швидкості введення і обробки інформації. Дійсно, враховуючи те, що допустима здатність (дискретизація) систем контролю таких складних деталей повинна бути менше 1 мкм (0,3–0,5 мкм), а площа об'єкту контролю, наприклад, напівпровідникової пластини або фотошаблону складає  $103\text{--}104\text{ мм}^2$ , то при прийнятному часі виробничого контролю від одиниць до десятків хвилин потрібно обробляти близько  $10^{10}$  крапок зображення з швидкістю не менше  $10^{10}$  крапок в секунду. Високу швидкість обробки можуть забезпечити лише обчислювальні системи з спеціалізованим проблемно-орієнтованим програмним забезпеченням.

Найбільшою швидкодією і інформативністю володіють аналізатори зображень, що реалізують паралельний аналіз зображень, при якому в процесі одноразового відрядкового сканування зображення визначаються геометричні параметри кожного об'єкту.

На відміну від послідовного аналізу (крапка за крапкою), метод паралельного аналізу (над групою крапок одночасно) дає можливість істотно скоротити час аналізу мікрозображення, що робить його придатним для виробничих умов. З тих, що серійно випускаються наразі ТАЗ, паралельний аналіз здійснюється тільки системою Quantimet-720 (Imanco, Великобританія) [4.2].

Телевізійні аналізатори зображення подібного типу є незамінними для збору великого об'єму статистичних даних щодо широкого набору геометричних параметрів досліджуваних топологічних структур та дефектів з метою визначення чинників, що впливають на якість виробів при механічній обробці. Проте досі такі спеціалізовані ТАЗ серійно не випускаються. Мабуть, для вирішення описаних вище завдань комплексного вимірювання геометрії складних мікрооб'єктів, а також для виділення і вимірювання дефектів топології доцільно розробити спеціалізовані ТАЗ із спрощеним алгоритмом, реалізованим апаратним шляхом.

Структурна схема такого ТАЗ, що забезпечує автоматичне виділення дефектів і визначення геометричних параметрів елементів топології і виявлених дефектів, представлена на рис. 4.2.

В якості приймача інформації, що здійснює фотоелектричну реєстрацію зображення з подальшим перетворенням її в цифрову форму, використовуються телевізійні трубки типу відикон або плюмбікон, що працюють для усунення спотворень зображення при скануванні в режимі імпульсного освітлення. Проте більш високих характеристик (високої роздільної здатності, рівномірності

чутливості, відсутності геометричних спотворень, стабільності в часі тощо) можна досягти, використовуючи двоємітерні фототранзистори або ПЗЗ-структури з числом елементів в рядку близько 1000; рис. 2.11. Структурна схема аналізатора зображень розміром світлочутливих елементів від 8 до 20 мкм, швидкістю прочитування близько 10 МГц і низьким рівнем шумів [4.4].

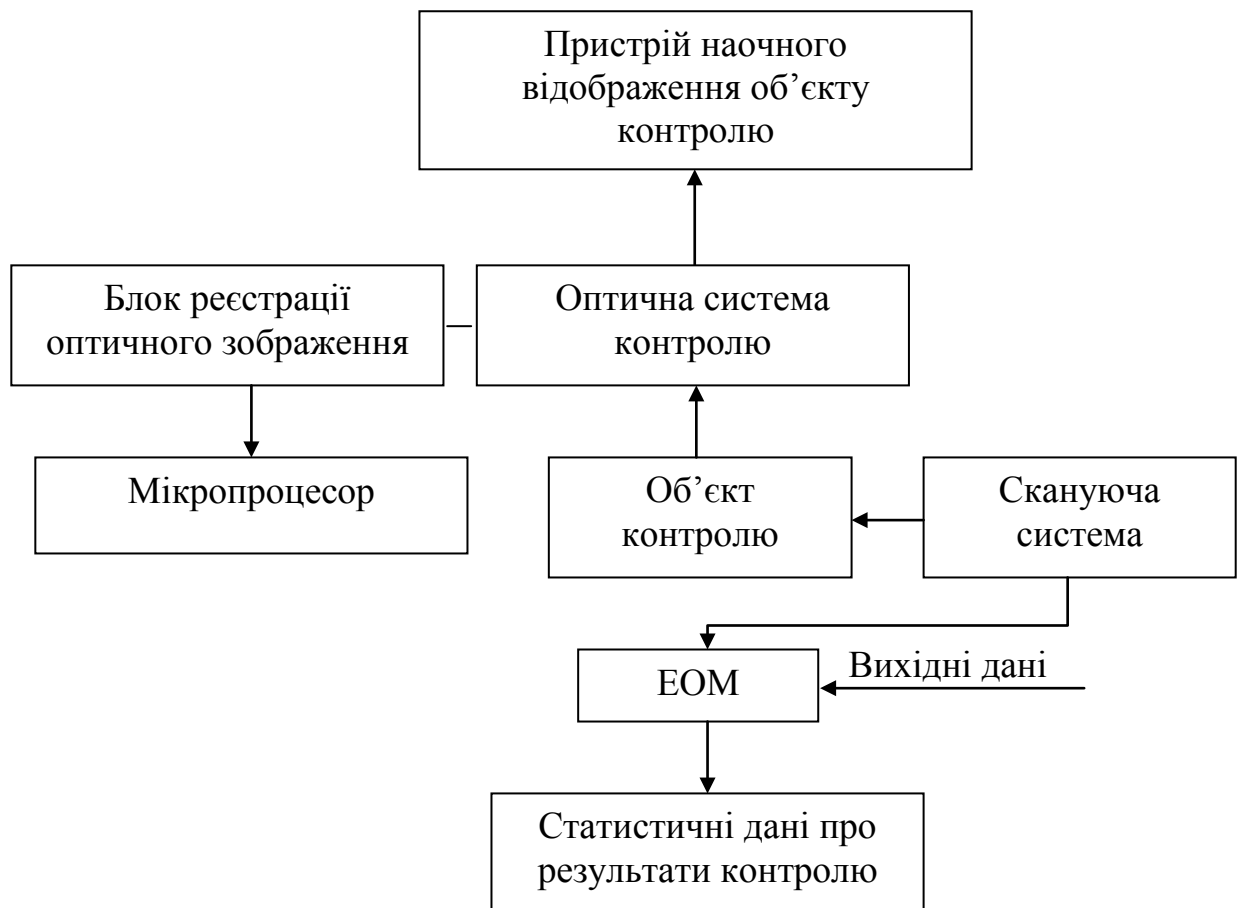


Рис. 4.2. Структурна схема усередненого аналізатора зображень

Застосування таких фотоприймачів дозволяє отримати найвищі швидкості і точність знімання інформації з контрольованого мікрозображення, перетворити її в цифрову форму найбільш простими і надійними засобами. Спеціалізований обчислювач, що працює в реальному масштабі часу, дозволяє уникнути низку недоліків, властивих приладам, які застосовують оптичні методи. Наприклад, одноканальний програмований метод виділення дефектів не вимагає поєднання і порівняння контрольованого і еталонного зображень, що найчастіше використовуються в системах аналізу дефектності мікрозображень [4.5].

Це надає можливість отримати вищу роздільну здатність і виявити дефекти менше 1 мкм, контролювати правильність виконання геометрії

надточних деталей, складних за формою, а також контроль топології малюнку на деталі. Метод забезпечує не тільки виявлення потенційних дефектів (з урахуванням їх розмірів і місцезонаштування щодо топологічного малюнка), але і дозволяє отримати вельми важливі статистичні дані про їх типи і конфігурацію. Маючи в своєму розпорядженні такі дані, можна за допомогою кореляційного аналізу встановлювати причини спотворень і дефектності і на цій основі здійснювати активне управління якістю процесів формування структур [4.6 – 4.9].

Сучасні ПЗЗ-приймачі типу матриця середнього класу (512x512 пікселів) можуть надавати 25 кадрів у секунду. Прилади з більш високим розділенням (4096x4096 пікселів) забезпечують тільки 0,5 кадри у секунду. Існують також більш швидкодійні прилади (1000 кадрів у секунду) при відповідному малому розділенні (80x80 пікселів).

Отже, у зв'язку із зростанням складності надточних деталей, ускладненням технологічних процесів виготовлення такі контрольно-вимірювальні системи мають високу актуальність. Вже на даний час поряд провідних фірм, що спеціалізуються на розробці і виготовленні контрольно-вимірювального устаткування для мікроелектроніки, випущено декілька простіших моделей ТАЗ, наприклад мікроструктурний аналізатор зображень MSA (Opton, ФРН), спеціально призначений для оперативного контролю в процесі виробництва ВС. Аналізатор MSA забезпечує вимірювання різних геометричних параметрів: розміри елементів і дефектів, кути нахилу фігур, радіуси округлення кутів, взаєморозташування елементів, розпізнавання структурних ознак, гранулометричний аналіз.

#### **§ 4.1.1. Використання ПЗЗ-приймачів зображення для автоматизації оптичних вимірювань**

В сучасних оптико-електронних приладах контролю стану об'єктів доволі часто використовують однокоординатні ПЗЗ-приймачі зображення. Надійна робота таких приймачів залежить від роботи формувача відеосигналу. Тому розглянемо принцип дії і конструктивні особливості ПЗЗ-приймачів зображення, функційну блок-схему формувача відеосигналу, конструктивне виконання і епюри його вихідних напруг.

Робота ПЗЗ, як відомо, базується на властивості структури метал-окис-напівпровідник (МОН-структура), яка може збирати і накопичувати пакети неосновних носіїв зарядів у локалізованих потенційних ямах на границі Si - SiO<sub>2</sub>.

Перенесення зарядових пакетів проводиться через певні інтервали часу шляхом керуемого переміщення потенціальних ям. Якщо прилад має планарний окисел, а підніжка рівномірно легована, то для одностороннього переносу заряду застосовують три фази. Більш глибока потенціальна яма утворюється під фазою, яка знаходиться під більшою напругою.



Важливим параметром, який характеризує якість ПЗЗ, є ефективність перенесення заряду, котра визначає частину заряду, що передається від однієї ями до іншої. Частина заряду, що залишилась, є неефективністю перенесення заряду, або його втратою. Неідеальність передачі заряду спотворює не тільки амплітуду, але й форму сигналу.

Наразі рівень технології дозволяє створити структуру із зарядовим зв'язком, в котрій неефективність передачі заряду не перебільшує  $10^{-4}$  на один перенос при тактових частотах від 5 до 10 МГц.

ПЗЗ має в загальному випадку масив фоточутливих елементів (секція накопичування зарядів) і зсувний регістр (секція перенесення заряду). Фоточутливими елементами можуть служити фотодіоди і фотоконденсатори (МОН-конденсатори). Вони виконують перетворення інтенсивності, яка падає на кожен елемент, в пропорційну величину електричного заряду. Це проходить під впливом розділу генеруємих фотонами електронних, дірочних пар і накопичування (інтегрування) цих зарядів на протязі визначеного проміжку часу в кожному елементі. Внаслідок цього величина накопиченого заряду пропорційна інтенсивності падаючого світла і часу інтегрування. Передача зарядових пакетів із всіх фоточутливих елементів у зсувний регістр проходить рівномірно та не перевищує 100 мс. Швидкодія ПЗЗ визначається швидкістю вводу зарядів із зсувного регістру.

Блок формувача відеосигналу розташований на виході оптичної системи і виконаний у вигляді автономної електричної системи. Електрична система блоку містить модуль фоточутливого однокоординатного ПЗЗ-приймача, який має фотоелементи і систему керування. ПЗЗ-приймач дозволяє перетворювати світловий сигнал на виході оптичної системи в еквівалентний по формі обвідної електричний відеосигнал для одночасної подачі його на входи АЦП і осцилографа для візуального спостерігання форми відеосигналу.

Функційна блок-схема формувача відеосигналу однокоординатного ПЗЗ-приймача представлена на рис. 4.3.

Блок 1 здійснює живлення суто ПЗЗ-приймача та елементів схеми керування.

Напруга живлення (+13В) подається на задаючий генератор 2 тактових імпульсів, і через джерело 3 опорної напруги на ПЗЗ-приймач 8. Вихід генератора 2 тактових імпульсів з'єднано з входом розподільника 4, як 8-розрядний зсувний регістр послідовної дії.

Зсувний регістр виконує перенос зарядових імпульсів до входу секції 5 формування фаз. Розподільник 4 виконує розподіл поступаючих від генератора 2 імпульсів на відповідні виводи мікросхем. Секція 5 формування фаз складається із секції 5 формувача фаз і шестиканального перетворювача рівня потужності. Секція 5 формування фаз формує вихідні напруги по трьом каналам, при цьому довжина імпульсів сигналу фаз перекривається по часу.

Перетворювач рівня потужності підсилює ці сигнали і подає їх на формувач 6 напруг, який складається з двох розподільників. Тригер сигнали на

виході розподільвача 4 збільшують період імпульсу на вході в 64 рази. Далі сигнал потрапляє через суматор на вхід другого розподільвача, котрий призводить до поділу періоду входного імпульсу на два, тобто  $T_{\text{вх}} = 2T_{\text{вих}}$ .

З виходу формувача фаз через суматори надходять два імпульсних сигнала (короткої і довгої синхронизації), котрі необхідні для синхронизації АЦП при зчитуванні відеосигналу ПЗЗ-приймачем зображень.

В схемі передбачено розподільвач 7, виділений на мікросхемі K561IE9, котрий призводить до збільшення часу накопичування зарядів імпульсних сигналів у 8 разів.

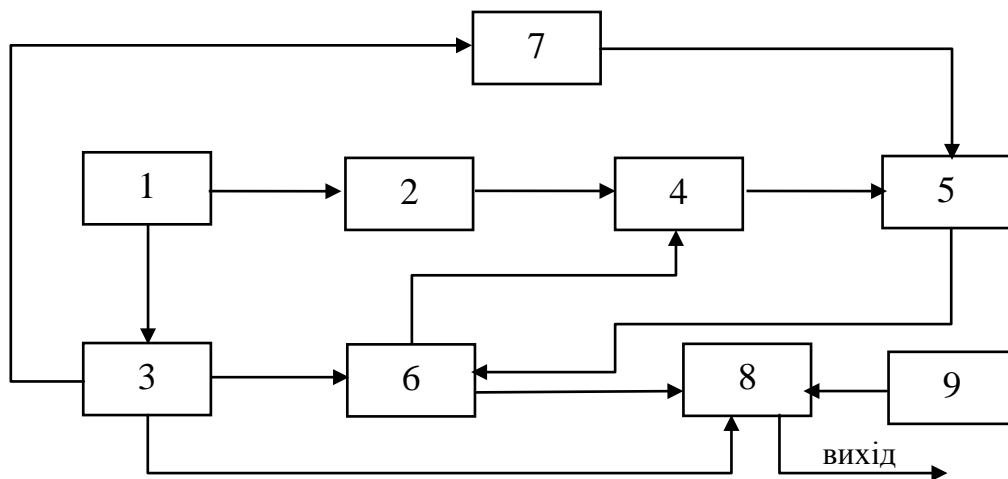


Рис. 4.3. Структурна схема ПЗЗ пристрою для фотометрування світлових полів: 1 - блок живлення УФВВ з напругою +12.....+18 В, 2 - задаючий генератор тактових імпульсів, 3 - джерело опорної напруги, 4 - розподільвач, 5- формувач фазових напруг, 6 - формувач напруг, 7- розподільвач, 8 - блок вхідних фільтрів, 9 - ПЗЗ-приймач

Таким чином отримують підтримку входного сигналу і формування зарядових пакетів для суматора, виконуючи рахунок до 288.

Вихід ПЗЗ-приймача 9 з'єднано з блоком вхідних фільтрів 8, який є узгоджувачем пристроєм з пристроями обробки зарядових сигналів: відеоконтрольні пристрої, мікропроцесорні обчислювальні пристрої.

Вихідні сигнали від ПЗЗ-приймача, епюри напруг котрих показані на рис. 4.4, є послідовністю імпульсів, що вводяться через АЦП в процесор системи ЧПК металообробного верстата. Величина напруг вихідного відеосигналу може бути до 1,5 В.  $\tau_n$  -довжина імпульсів,  $T$ -період інформаційних імпульсів, які вводяться,  $T = n\tau_n$ .

Введення даних через АЦП в обчислювальний пристрій виконується слідуєчим чином. Звернення до підпрограми вводу даних з АЦП перетворює відеосигнал в масив даних і розміщує в оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗП) системи.

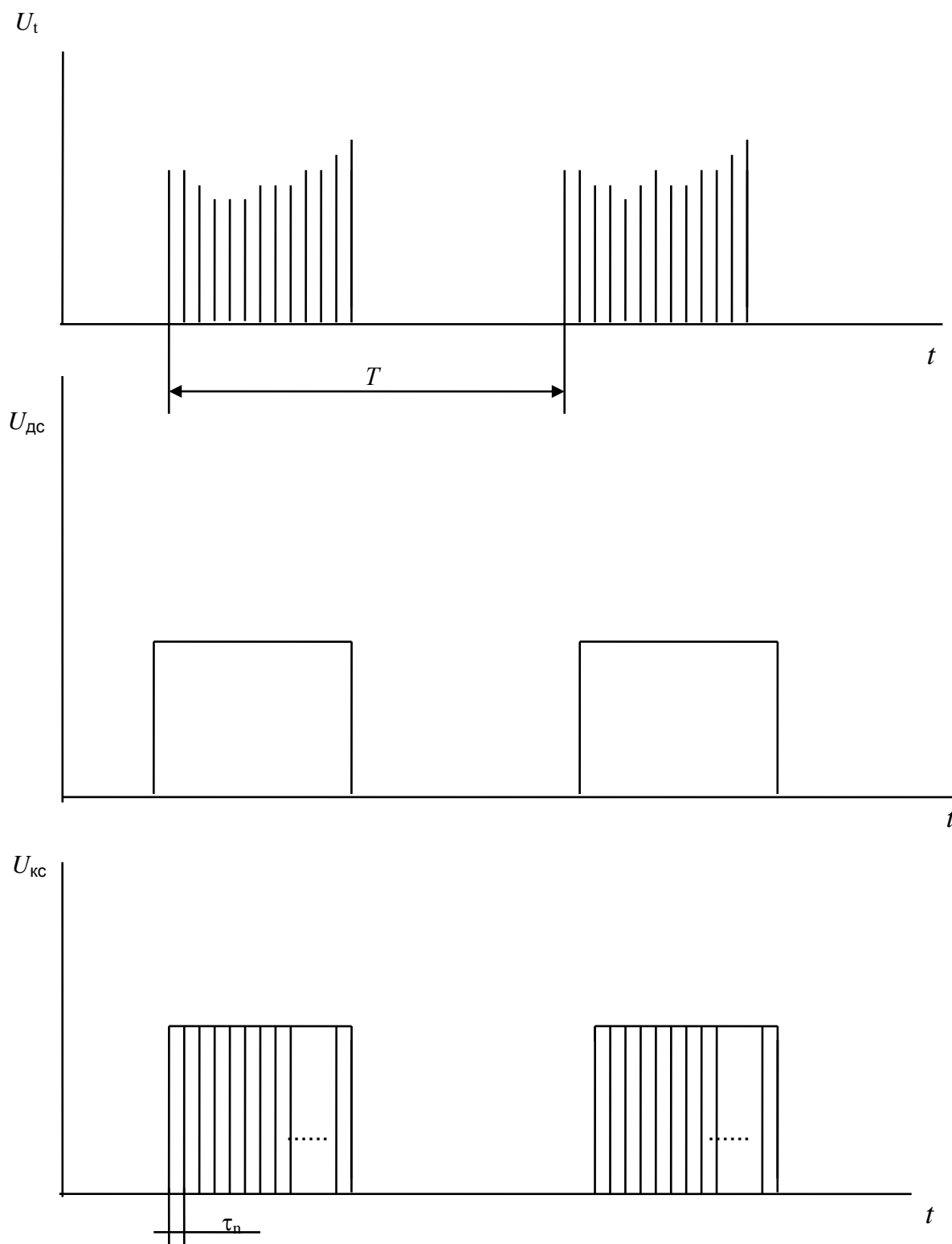


Рис. 4.4. Епюри напруг вихідних сигналів ПЗЗ-приймача

Потім з основної програми підготовляють комутатор і встановлюють необхідний режим обробки АЦП. По нульовому каналу проводять введення

відеосигналу після скидання модуля керування проходить введення ініціативних сигналів, і програма входить в режим очікування ДСІ, після приймання ДСІ також відкидається модуль і проводять приймання КСІ.

Застосування ПЗЗ-приймачів дозволяє автоматизацію оптико-електронних приладів, що значно підвищує точність виготовляємих деталей, та врешті продуктивність виробництва.

В оптичній схемі приладу (рис. 4.5) вимірювача мінімальний розмір елементу, вимірювання якого ще можливо, визначається числовою апертурою використовуваного об'єктиву. Для максимального використання апертури доцільно суміщати площину предметів з фокальною площиною об'єктиву, вводячи одночасно компенсуючу лінзу у візуальний канал. Одночасно забезпечується мінімум спотворення хвильового фронту зондуємого лазерного пучка в площині предметів.

У приведеній оптичній схемі дифракційного вимірювача неточності установки відстані об'єктив-вимірюваний елемент можуть позначитися на результатах вимірювань, тому глибина різкості візуального каналу повинна якомога можливо малою.

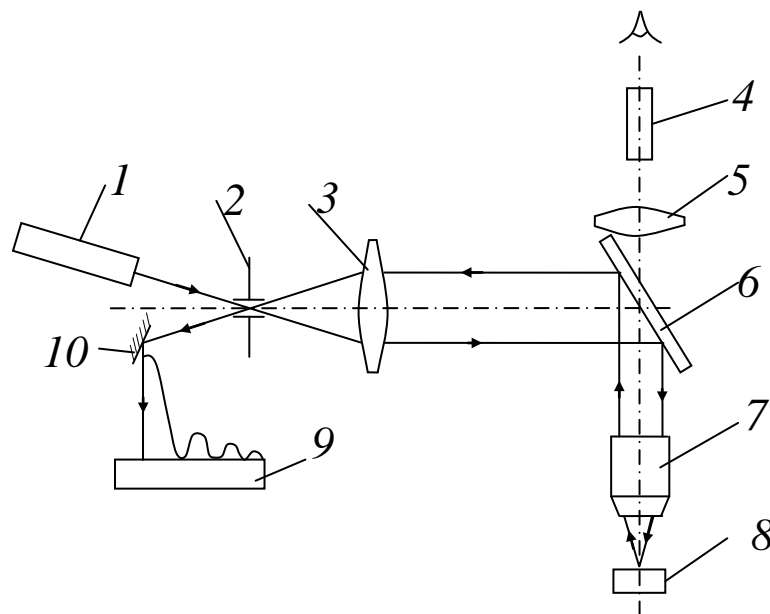


Рис. 4.5. Оптична схема дифракційного вимірювача, що працює у відбитому світлі: 1 – лазер, 2 – діафрагма, 3 – лінза телескопічної системи, 4 – окуляр, 5 – компенсуюча лінза, 6 – світлоподільник, 7 – об'єктив вимірювального та візуального каналів, 8 – об'єкт контролю, 9 – ПЗЗ-фотоприймач, 10 – дзеркало

При визначенні розміру елементу за інтервалом між мінімумами однієї з гілок дифракційної картини, для розширення меж вимірювань в область

менших розмірів, застосування даної схеми з позаосьовим ходом зонduючого променя переважно. Крім регулювання розміру зонда діафрагма знижує рівень паразитного засвічення фотоприймача, обумовленого розсіянням і віддзеркаленням лазерного випромінювання від оптичних елементів. Зіставлення різних варіантів оптичних схем показує, що для контролю розмірів елементів, розташованих як на прозорій, так і на непрозорій підкладках, найбільш зручна схема автоколімації.

Розглянемо далі алгоритм обробки корисного сигналу при вимірюванні розмірів елементів на дифракційному вимірювачі за схемою, представленою на рис. 4.5. Розподіл інтенсивності в дифракційній картині від лінійного елементу є функцією, що описується аналогічно (3.6) виразом

$$y = I(x) = I_0 \sin^2(2ax_0/\lambda z) \quad (4.3)$$

Вимірювання по положеннях симетричних нулів інтенсивності досить утруднене, оскільки діапазон зміни інтенсивності випромінювання в даній області найбільший. В цьому випадку при використанні ПЗЗ-фотоприймача спостерігається розтікання заряду з осередків з високою освітленістю у бік слабких освітлених ділянок. Внаслідок цього спотворюється положення нулів інтенсивності на виході індикатора у порівнянні з дійсно спостережуваними мінімумами дифракційної картини. Якщо ж зробити "грубішою" чутливість фотоприймача, то рівень сигналу, відповідного мінімумам картини, а також максимумам вищих порядків виявляється недостатнім для забезпечення високої продуктивності вимірювань через підвищеного впливу електричних перешкод.

Завдання підготовки даних для подальшого машинного аналізу спрощується, якщо на приймальну площадку ПЗЗ-фотоприймача падає випромінювання лише однієї гілки дифракційної картини без нульового (центрального максимуму). Тоді декілька максимумів інтенсивності, що потрапляють на приймальну площадку фотоприймача, мають сумірні амплітуди. Завдання визначення розміру елементу зводиться в цьому випадку до знаходження взаємного розташування сусідніх мінімумів інтенсивності дифракційної картини на світлочутливій координатній лінійці і розрахунку вимірюваного розміру за формулою

$$2a = K/(p_{02} - p_{01}) \quad (4.4)$$

де  $p_{01}$  та  $p_{02}$  – координати перших двох мінімумів у масштабі ПЗЗ-лінійки;  
 $K$  – нормуючий множник, постійний для вибраних значень  $\lambda$  та  $z$ , що визначається контрольним вимірюванням тестового елементу.

Основні етапи (алгоритм) рішення поставленої задачі на ЕОМ полягають в наступному.

1. Занесення в пам'ять ЕОМ чисельних значень амплітуди сигналу, що знімається з виходу ПЗЗ-фотоприймача для всіх 512 (або 1024) світлочутливих площадок, з відповідним запам'ятовуванням порядкового номера площадки.

2. Встановлення первинної лівої межі пошуку в області існування перших двох мінімумів.

ЕОМ по черзі проглядає всі значення амплітуд, записані в пам'ять, починаючи з найбільшого порядкового номера світлочутливого елементу. При цьому грубо визначаються можливі положення перших двох мінімумів. Умовою попереднього ототожнення певної ділянки дифракційної картини мінімуму є існування точок з амплітудами, меншими деякого заданого рівня (на Рис.4.6, що ілюструє методику розрахунку, цей рівень складає 10 відн. од.).

За ліву межу розрахунку положення мінімуму береться елемент під номером  $p_1$  сигнал з якого приблизно рівний половині амплітуди найближчого справа максимуму  $A_{m1}$ , за яким розташований черговий мінімум. Якщо зліва від першого мінімуму не знаходиться точка  $p_1$  з амплітудою  $A_{p1} \geq A_{m1}/2$ , то мінімум не вважається значущим і описаний перевірки піддається область поблизу наступного мінімуму.

Таким методом із залежності  $I = f(n)$  (Рис. 4.6) виділяються області двох сусідніх мінімумів, інші мінімуми не розглядаються.

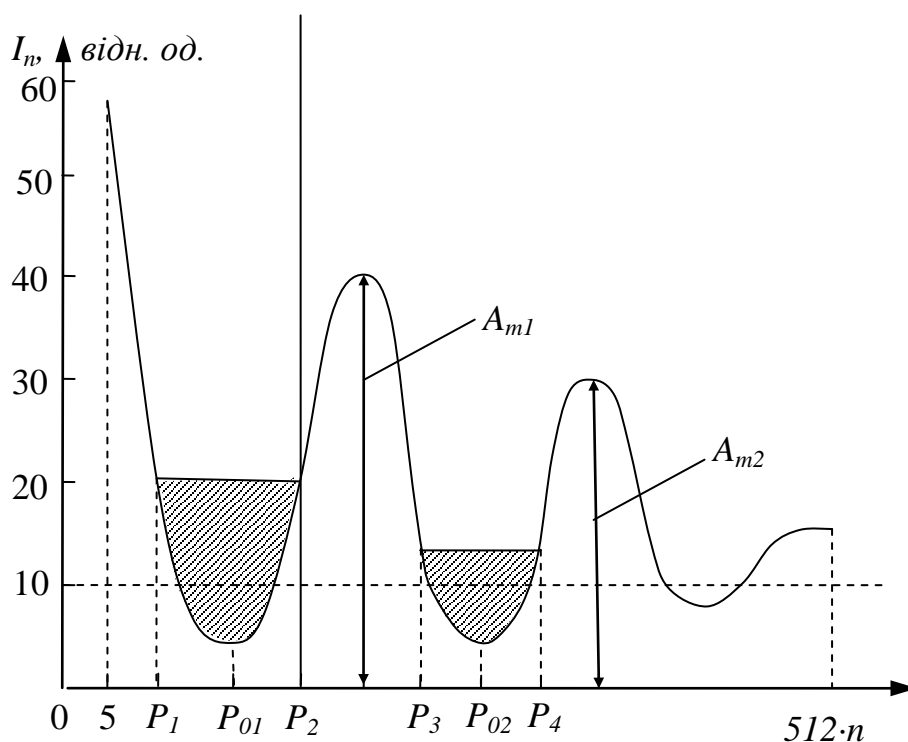


Рис. 4.6. Пояснення до алгоритму розрахунків положення мінімумів дифракційного зображення

### 3. Визначення координат мінімумів.

Оскільки реальна дифракційна картина має шуми, достовірне положення мінімумів її інтенсивності не завжди співпадає з положеннями елементів фотоприймача, що мають мінімальне значення вихідного сигналу. У даній

ситуації краща точність може бути досягнута при використанні ймовірностно-статистичних методів. Найпростішим з них є спосіб знаходження координати мінімуму як координати центру тяжіння фігури, виділеної на Рис.4.6 штрихуванням. Для першого мінімуму її значення рівне:

$$p_{01} = \sum_{n=p_1}^{p_0} \left[ \left( \frac{I_{m1}}{2} - I(n) \right) n \right] / \sum_{n=p_1}^{p_1} \left( \frac{I_{m1}}{2} - I(n) \right), \quad (4.5)$$

де  $n$  - номери елементів ПЗЗ-фотоприймача в області від  $p_1$  до  $p_i$ ,

$I(n)$  – амплітуда сигналу, що знімається з  $n$ -го елементу;

$I_{m1}$  – амплітуда найближчого максимуму. Аналогічно може бути визначена координата  $p_{02}$ .

4. Розрахунок лінійного розміру елементу. При відомих значеннях  $p_{01}$  і  $p_{02}$  і експериментально підібраному значенні  $K$  ширина вимірюваного елементу обчислюється ЕОМ за залежністю (4.4). Очевидно, що реалізація подібного алгоритму не представляє технічних труднощів.

Як наголошувалося вище, дифракційний метод є одним з найбільш точних методів вимірювань лінійних розмірів елементів. Основними помилками при вимірюваннях по схемі, що розглядається, є похибки, обумовлені оптичною і електричною частинами приладу, недосконалістю алгоритму обробки інформації.

До помилок, що викликаються оптичною частиною приладу, відносяться: відмінність фронту падаючої хвилі в області лазерного зонда від плоского; неточність наведення зонда на вимірюваний елемент; кінецьності товщини вимірюваних об'єктів; наявність оптичних шумів, пов'язаних з розсіянням і перевідбиттям лазерного випромінювання. Аналіз показує, що ступінь відмінності фронту падаючої хвилі від плоскої до реальної розбіжності лазерного пучка (близько 1 мрад) з урахуванням телескопічної системи набагато менша  $\lambda/2$  і практично не вносить похибки до результатів вимірювань, якщо діаметр зонда у декілька разів більше вимірюваного розміру.

Іншим джерелом можливих похибок є неточність наведення лазерного зонда на вимірюваний елемент. Зміщення лазерного зонда щодо контрольованого елементу призводить до спотворення форми дифракційної картини. Значним моментом тут є розмір лазерного зонда.

З одного боку зменшення діаметру зонда дозволяє проводити контроль елементів при вищому ступені їх інтеграції. З другої — скорочення діаметру зонда до значення меншого, ніж дві ширины вимірюваного елементу, супроводжується порушенням умов, що забезпечують вид дифракційного спектру, близького до фраунгоферовського, і ускладненням розшифровки дифракційної картини.

Зростання похибки при цьому посилюється внаслідок спотворень дифракційної картини при асиметричному наведенні зонда на вимірюваний елемент. За цими причинами в діапазоні від 1,5 до 8 мкм при діаметрі оптичного зонда 15 мкм спостерігається поступове збільшення нелінійності

градуованої характеристики приладу у міру збільшення розміру. Врешті при розмірі 8 мкм це відхилення сягає 2%.

Додатковим джерелом похибок є наявність оптичних шумів в дифракційному спектрі. Зменшення рівня шуму може бути досягнуте за рахунок використання діафрагми, розташованої у фокальній площині лінзи телескопічної системи. Проте в цьому випадку бічне відхилення положення діафрагми від осевого приводить до появи додаткової похибки вимірювань. Це накладає жорсткі вимоги на стабільність положення діафрагми (менше 0,1 мм).

Аналіз показує, що основний внесок в похибка вимірювань, обумовлену оптичною частиною, вносить розфокусування, проте ця похибка не перевищує  $\delta_p \approx 1\%$  від вимірюваної величини, якщо глибина різкості в каналі візуального наведення оптичної системи складає не більше 1 мкм.

Похибки вимірювань, пов'язані з електричною частиною приладу, можуть бути викликані нелінійностями передавальних функцій підсилювальних ланок на етапі посилення аналогового сигналу, неоднорідністю координатної чутливості ПЗЗ-фотоприймача і неточністю кодування на етапі аналогово-цифрового перетворення.

Подальша обробка цифрового двійкового коду практично не збільшує похибку вимірювань, якщо число розрядів, з якими оперує ЕОМ, істотно вище за розрядність вживаного АЦП. Можливість похибки вимірювань на рівні ЕОМ може виникнути лише при неправильному виборі алгоритму обробки корисного сигналу. Нелінійні спотворення, що вносяться сучасними операційними підсилювачами загального використання, зазвичай не перевищують 1%, а за наявності негативного зворотного зв'язку можуть складати десятки і соті долі відсотка.

Розрахунки показують, що неоднорідність чутливості по довжині багатоеlementного фотоприймача близько 10% приводить до похибки обчислення положення центру ваги (див. Рис. 4.6) не більше ніж на 1%. Основною складовою помилок АЦП є похибка квантування, в порівнянні з якою такі складові похибки, як нелінійність перетворення і нестабільність опорної напруги, можуть бути прийняті рівними нулю.

І, нарешті, похибки вимірювань, обумовлені недосконалістю алгоритму обробки інформації, пов'язані з тим, що через шуми мінімуми дифракційного спектру знаходяться розрахунками центру тяжіння плоских фігур, утворених віссю координат і ділянками функції дифракційного розподілення інтенсивності, розташованими в проміжку між сусідніми максимумами за допомогою створених програмних методів.

При такому алгоритмі розрахунку мінімумів дифракційного спектру можлива поява похибки вимірювань через неспівпадання координат мінімумів і центрів тяжіння обумовлених вище фігур, оскільки функція дифракційного розподілу інтенсивності є затухаючою. Крім того, неспівпадання цих координат може виявитися залежним від розміру контролюваного елемента. Збільшення



розміру супроводжується зростанням просторової частоти дифракційного спектру і відповідним зменшенням числа осередків світлочутливої лінійки ПЗЗ-фотоприймача, що приходяться на інтервали пошуку мінімумів дифракційної картини. При обмеженому загальному числі елементів ПЗЗ-фотоприймача остання обставина може привести до зростання відносної похибки вимірювань.

Розрахунок похибки при визначенні положення мінімумів дифракційного спектру по розглянутому алгоритму шляхом зіставлення мінімумів *sinc*-функції з центрами тяжіння заштрихованих плоских фігур (див. Рис. 4.6) показує, що вона не перевершує  $\delta_p \approx 1\%$ .

Щодо похибки, обумовленої кінцевим числом елементів розкладання реального фотоприймача, її максимальне значення чисельно рівне розміру одного елементу розкладання, або у відносному вигляді

$$\delta_n \approx (2/n) \cdot 100\%,$$

де  $n$  – число елементів розкладання між сусідніми мінімумами.

Оскільки при розрахунку розміру елементу необхідно мати координати двох мінімумів, значення  $\delta_i$  є подвоєним.

Оцінимо цю складову похибки. Припустимо, що при вимірюванні розміру в 1 мкм на лінійку фотоприймача потрапляє два мінімуми дифракційної картини. У цьому випадку відповідно до прийнятого алгоритму обробки в зону між двома мінімумами увійде близько половини від загального числа елементів розкладання. Наприклад, при загальному числі елементів розкладання 512 отримаємо  $\delta_i = 0,8\%$ .

Очевидно, що при незмінному розмірі дифракційної картини в площині фотоприймача похибка у визначенні відстані між мінімумами для розміру 10 мкм складе 8%. Звідси слідує вивід, що число елементів розкладання фотоприймача необхідно збільшувати. Наприклад, ПЗЗ-приймачі з числом елементів 1024 і 2048. Для 2048-елементного приймача вказана похибка складає менше 0,2%.

З метою забезпечення високої точності необхідно мати декілька піддіапазонів вимірювань, для яких змінено або місце розташування фотоприймача, або масштаб дифракційної картини. Число діапазонів повинне вибиратися по допустимій похибці для верхньої межі кожного з діапазонів.

Якщо припустити, що всі перераховані вище похибки діють незалежно один від одного, то результуюча похибка даного дифракційного вимірника буде рівна  $\delta_\Sigma = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_y^2 + \delta_i^2}$  де  $\delta_0 \approx 0,01$  – похибка, що вноситься оптичною частиною приладу;  $\delta_E \approx 0,004-0,015$  – похибка, що створюється електричною частиною приладу;  $\delta_H \approx 2a(0,002-0,008)$  — похибка, обумовлена кінцевим числом елементів розкладання в багатоелементному фотоприймачі.

Розрахунок результуючих похибок представлений на рис. 4.7, криві 1 і 2 — для фотоприймачів з 512 і 1024 фоточутливими елементами відповідно. Приведені криві підтверджують необхідність розбиття всього діапазону

вимірювань на піддіапазони з метою зменшення похибки вимірювань із зростанням розмірів. Число піддіапазонів може бути тим менше, чим більше число елементів у фотоприймачі. При числі елементів більше 4096 похибка приладу практично не залежить від вимірюваного розміру і в найцікавішій для практики області 1—10 мкм може бути перекрита одним діапазоном при максимальній похибці вимірювань не більше 2%.

Дослідження показують, що даний дифракційний вимірювач розмірів дає якнайкращі результати при контролі елементів на деталях типу тонких металевих плівок.

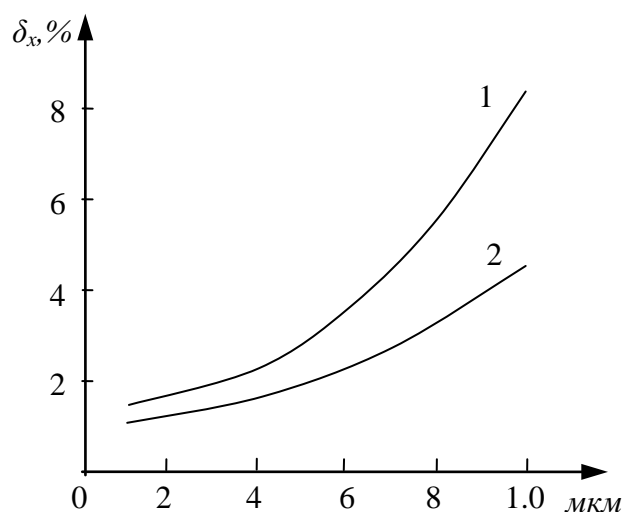


Рис. 4.7. Залежність відносної похибки вимірювань приладу від розміру вимірюваного елементу

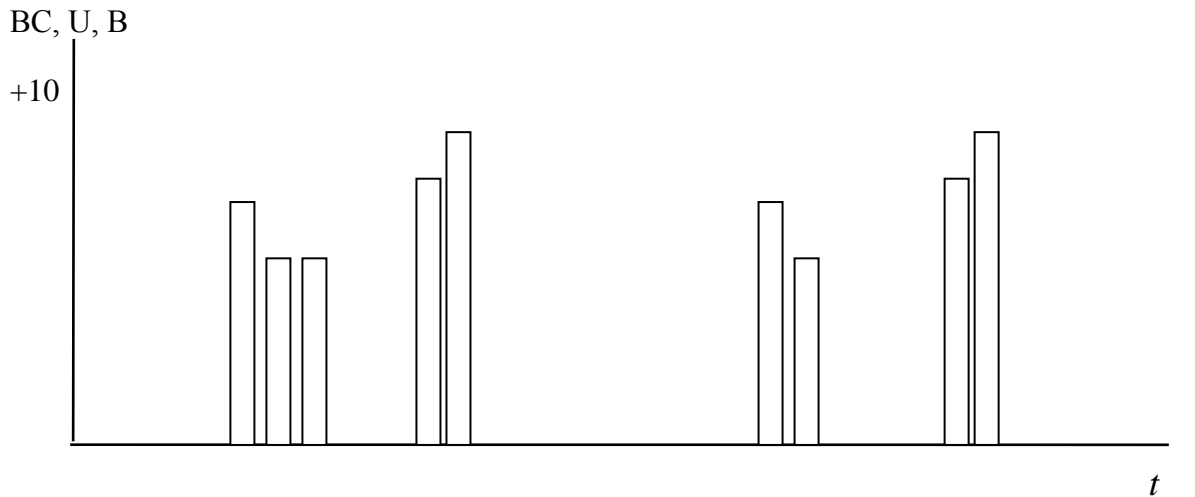
Проте дифракційний метод вимірювань, як і інші методи, має певні обмеження і свою сферу використання.

Зокрема, при контролі металізованих фотошаблонів з розмірами елементів в області 1 мкм вимірювання можуть бути здійснені з похибкою близько 0,01 мкм, нижня межа вимірювань цим методом лежить в області 0,5–0,7 мкм.

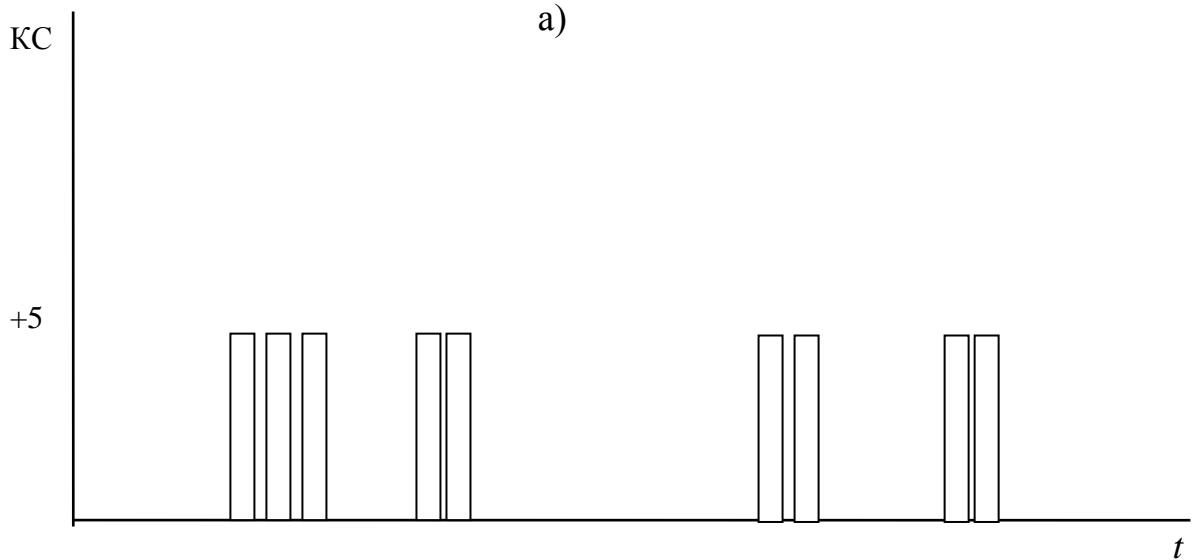
#### § 4.1.1.1. Вимоги до інформаційних сигналів

Інформаційні сигнали, що надходять у систему та узгоджуються з блоком обробки, повинні мати визначені параметри для максимально точного та достовірного перетворення. Оскільки для аналізу розподілів світлових полів в автоматизованому режимі роботи оптико-електронного приладу доцільно застосовувати ПЗЗ-приймачі, необхідно визначити вимоги до інформаційних сигналів, які надходять у модуль обробки.

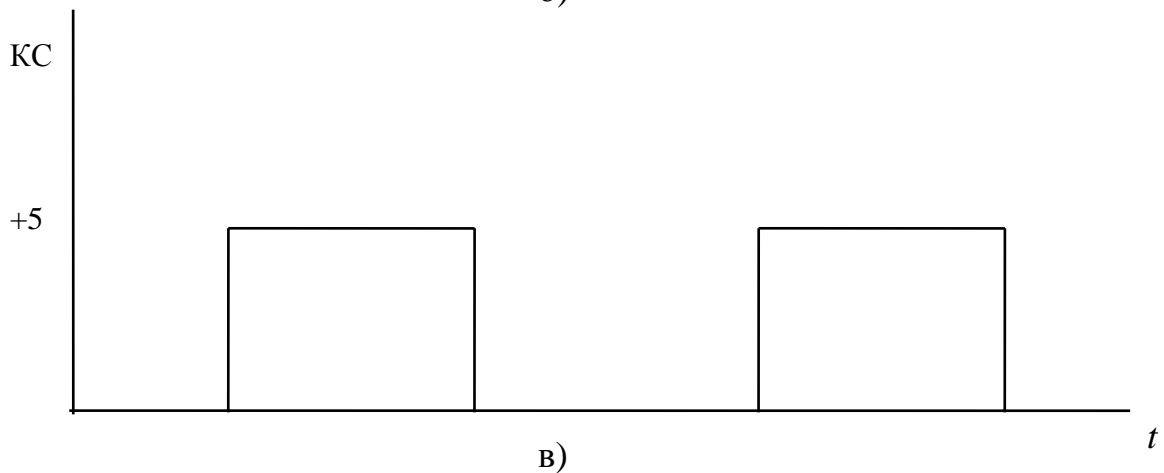
На виході однокоординатного ПЗЗ-приймача, використовуємого в складі створюємих модулів спостереження процеса, формується три вихідних сигнала: інформаційний відеосигнал, сигнал короткої синхронізації, сигнал довгої синхронізації, епюри напруг котрих наведені на рис.4.8.



а)



б)



в)

Рис. 4.8. Епюри вихідних напруг інформаційного сигналу

Тривалість імпульсів обирається (встановлюється) у відповідності з часом кодування АЦП в модулі узгодження. Амплітуда імпульсів встановлюється в межах динамічного діапазона АЦП.

Відеосигнал (ВС) містить прямокутні імпульси, амплітуда котрих пропорційна освітлювальності відповідних фотоелементів ПЗЗ приймача, а обвідна їх співпадає по формі з розподіленням інтенсивності поля, яке фотометрують.

Сигнал короткої синхронізації (КС) складається з таких самих прямокутних імпульсів, як і відеосигнал, але амплітуда всіх імпульсів постійна по амплітуді та не залежить від інтенсивності фотометрованого світлового поля. Імпульси короткої синхронізації повністю зв'язані імпульсами відеосигналу і призначені для запуску аналогово-цифрового перетворювача у відповідному модулі узгодження контрольно-вимірювального пристрою.

Сигнал довгої синхронізації (ДС) представляє собою прямокутні імпульси, тривалість котрих рівна тривалості відеосигналу, тобто дорівнює тривалості такта перенесення заряду ПЗЗ приймача. Амплітуда цих імпульсів постійна в часі та визначається напругою живлення схеми формування відеосигналу ПЗЗ приймача, а також її структурою.

Отже, застосування ПЗЗ приймачів як пристрою реєстрації світлових полів на виході оптичної системи контрольно-вимірювального приладу дозволяє автоматизувати процес вимірювання геометричних розмірів деталей, контролювати стан технологічного обладнання, як буде показано далі. Це підвищує якість надточних виробів, які отримані внаслідок механічної обробки. Тим самим підвищується продуктивність промислового виробництва.

#### **§ 4.1.2. Автоматизовані лазерні скануючі пристрої**

Для спрощення процесу контролю складних за контуром виробів, а так само для сканування й зворотного інжинірингу, доцільним є застосування контрольних засобів при механічній обробці деталей разом з координатно-вимірювальними машинами (КВМ) [4.10 – 4.12].

Передові технології у сфері геометричних вимірювань деталей при (або після) механічній обробці полягають у наступному.

В умовах сучасного ринку, жорсткої конкуренції й постійного вдосконалювання технологій на підприємствах різних сфер промисловості, таких як автомобільна, авіаційна, нафто- і газодобувна промисловість тощо, гостро постає проблема швидкого й всебічного контролю деталей, які виготовлені механічною обробкою, технологічного оснащення, заготовок, а також одержання прототипів майбутніх виробів.

Наразі більшість вітчизняних приладобудівних та машинобудівних підприємств все ще використовують як засоби контролю якості, вимірювання різні шаблони, щупи та контрольні пристосування, які найчастіше не дозволяють провести вимірювання в локальних зонах, зазначених на вимогу конструкторів, технологів і контролерів ОТК.

Для виготовлення подібного обладнання потрібні значні фінансові й часові витрати, а крім того, необхідні більші площі для її зберігання. Буває, що підприємство використовує у своєму виробництві передові CAD/CAM/CAE-технології, але післяопераційний контроль готових виробів при цьому проводиться штангенциркулями, у наслідок чого ланцюг автоматизації підготовки виробництва виявляється незамкнутим. Також, якщо деталь повинна відповідати досить жорстким вимогам до її відповідності геометричним параметрам, якість такого виробництва значно зменшується.

На машинобудівних підприємствах, де застосовуються стаціонарні контрольно-вимірювальні машини (КВМ), неможливо зробити вимірювання пересува важко й великогабаритних об'єктів, зробити виміри під час проведення технологічного процесу виготовлення деталі. У зв'язку із цим одержати бажаний економічний ефект від настільки дорогих вимірювальних пристосувань у низці випадків досить важко.

Слід зазначити, що за технологією виробництва не завжди необхідна така більша точність, яку забезпечують порталні машини. Тому багато машинобудівних підприємств почали виявляти велику цікавість до нових сучасних мобільних вимірювальних машин, що відповідають таким вимогам, як:

- низька вартість (у кілька разів нижче, ніж у стаціонарних КВМ);
- більша точність вимірів;
- універсальність;
- висока мобільність;
- можливість автономної роботи в умовах реального виробництва, безпосередньо в механообробному цеху;
- простота навчання персоналу й експлуатації КІМ й її програмне забезпечення;
- взаємозв'язок із сучасними CAD/CAM-системами.

Наприклад, КВМ фірми FARO Technologies, Inc. (США) добре відомі й використовуються на різних підприємствах при механічній обробці.

Відмінними рисами даних машин є:

- висока надійність;
- більше висока точність виміру (повторюваність до  $\pm 0,006$  мм);
- відповідність сертифікату ISO 9001;
- відповідність сертифікату ISO/IEC/EN 17025;
- наявність температурної компенсації;
- сумісність із щупами типу RENISHAW, які застосовують для виміру прецизійних, а також нежорстких виробів;
- довговічна конструкція з алюмінію й углепластика;
- зручний дизайн.

КВМ FARO складається з опорної плити, що кріпиться до будь-якого підходящого місця, і декількох з'єднаних між собою шарнірами колін.

У кожному шарнірі є чутник контролю кутових переміщень, що у режимі реального часу стежить за кутом повороту коліна, у наслідок чого програмне забезпечення прораховує координати відкаліброваного вимірювального щупа. Залежно від числа колін є машини із шістьма або сімома ступенями волі. Звичайно при роботі цілком достатньо шести ступенів свободи, але для низки завдань, наприклад для сканування, рекомендується застосовувати КВМ із сімома ступенями, тому що це виявляється більше зручним.

Робочою зоною КВМ є сфера з діаметрами 1,2; 1,8; 2,4; 3,0 або 3,7 м, при цьому щуп може легко потрапити практично в будь-яку крапку усередині цієї сфери. Найточніша КВМ FARO Platinum 4 має повторюваність  $\pm 0,006$  мм і точність  $\pm 0,018$  мм на робочій зоні 1,2 м.

FARO не має приводу, і є КВМ типу маніпулятора, тому всі переміщення колін і фіксація крапки виміру виробляються оператором вручну. Вимір здійснюється в комплексі з персональним комп'ютером, а для підвищення мобільності краще використати ноутбук.

Процес виміру за допомогою КВМ FARO відбувається в такий спосіб. Прилад установлюють поблизу вимірюваного об'єкта, підключають комп'ютер і за допомогою програмного забезпечення калібрують щуп, яким планують здійснювати вимірювання. Після цього прилад має бути готовим до роботи. Ця операція має час від 5 до 10 хвил. Далі необхідно задати систему координат («прив'язатися до деталі») щодо якої будуть вироблятися виміри. Найчастіше користуються принципом збереження баз: визначають систему координат щодо базових елементів деталі для того, щоб мінімізувати похибки. Іншими словами, можна прив'язатися по площинах, отворах, циліндричних поверхнях тощо.

Для випадків, коли на виробі немає явних геометричних баз, передбачений метод так називаної ітеративної прив'язки, коли на CAD-моделі вибирається кілька крапок у різних площинах. Після цього оператор за допомогою КВМ FARO вимірює ці крапки на контрольованій деталі. Далі програмне забезпечення методом послідовних наближень робить сполучення обраних й обмірюваних крапок. Після прив'язки починається безпосередньо процес виміру виробу. Контроль виробляється контактним способом, тобто для зняття якої-небудь крапки необхідно зафіксувати щуп на виробі й нажати кнопку на виконавчому органі – «руці» FARO.

У процесі роботи на екран монітора виводиться місце розташування щупа в реальний момент часу, розташування вимірюваних крапок і величина їхнього відхилення. Всі побудови виробляються таким чином, виходячи з геометричних розрахунків: тобто, для того, щоб проконтролювати окружність, потрібно замірити мінімум три крапки, лінію — дві крапки, площа — три й т.д.

Вимірюючи об'єкт, ми можемо одержати всі дані про нього, а саме: відхилення від номінальної величини, координати щодо бази, положення щодо інших об'єктів виробу, відхилення від площинності, циліндричності, співвісності тощо.

Інакше кажучи, всі ті геометричні розміри деталі, які передбачені на конструкторському кресленні, а також для контролю якості яких найчастіше використовують велику розмаїтість вимірювальних інструментів, можна з легкістю контролювати одним приладом та, що дуже важливо, одержувати внаслідок проведених робіт звітність у графічному вигляді (рис. 4.9).

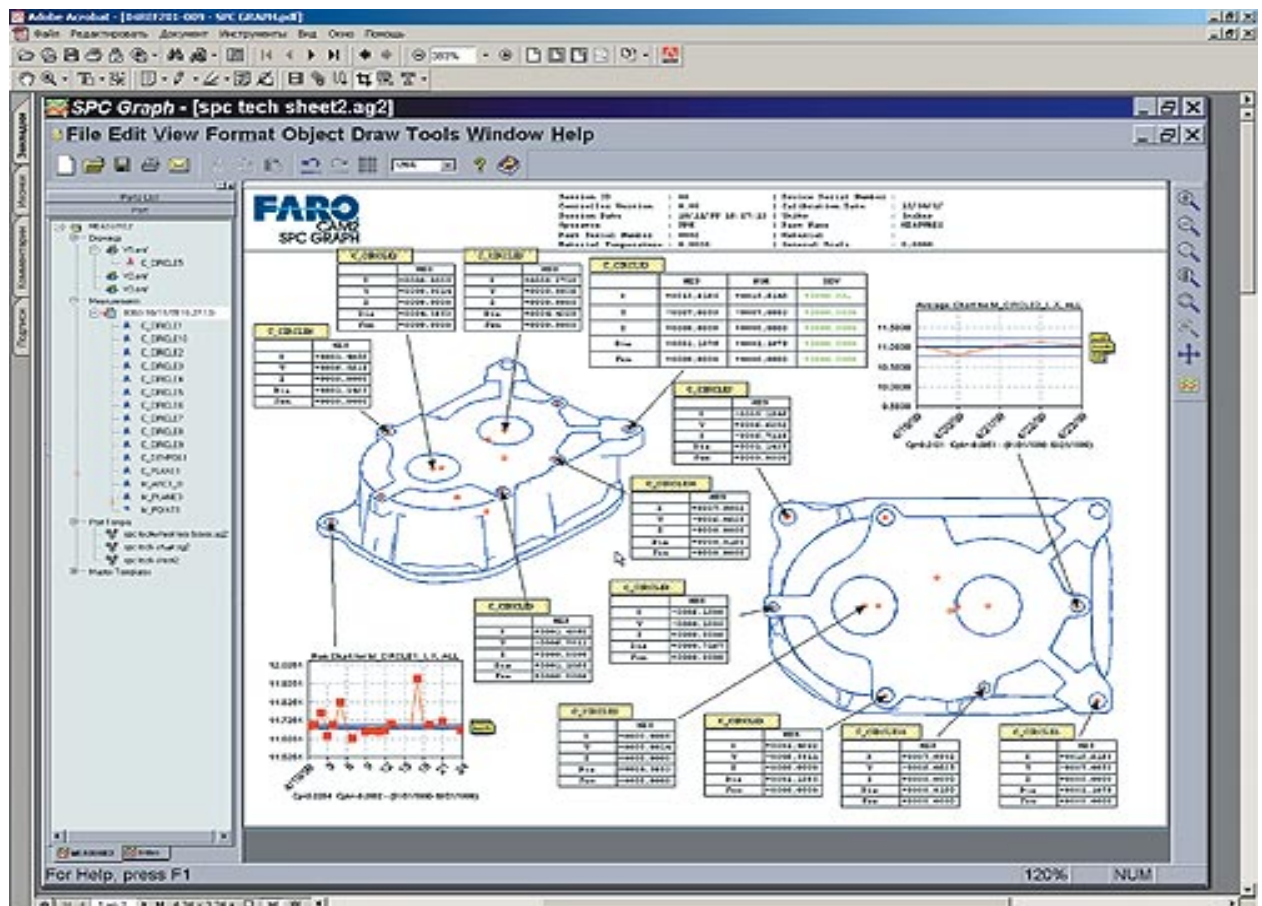


Рис. 4.9. Загальний вигляд інтерфейсу програмного забезпечення при виконанні графічних конструкторських та розрахункових робіт

Необхідно також відзначити можливість контролю складних поверхонь, наприклад, формотворення поверхонь штампа, правильність виготовлення яких практично неможливо перевірити жодним приладом, крім КВМ. Для контролю подібних виробів необхідно використати CAD-модель, причому вона може бути трансльована з будь-якої CAD-системи.

Дуже часто КВМ FARO використовують для сканування досвідчених зразків виробу. Дані про їх можна одержати у вигляді крапок, лінії, сплайнів, полілінії, окружностей, площин тощо, за якими надалі будується CAD-модель.

Кріплення КВМ FARO поблизу вимірюваного об'єкта можна робити декількома способами під будь-яким кутом від 0 до 180°:

- По-перше, за допомогою струбцин, наприклад на столі;
- по-друге, за допомогою магнітних і швидкоз'ємних сполучних кріплень;
- по-третє, використовуючи складні триноги;
- по-четверте, за допомогою стійок на роliках з колісами, що вбираються, які можуть застосовуватися для будь-якого контрольно-вимірювального органу КВМ, і мають регулювання по висоті залежно від моделі.

Існує кілька видів програмного забезпечення для КВМ FARO залежно від потреб того або іншого виробництва. Програмне забезпечення виконане так, щоб відповідати всім вимогам на кожному етапі процесу, починаючи із проектування й закінчуючи виміром і контролем. Стандартне програмне забезпечення CAM2 Measure допоможе виміряти, отсканувати, проаналізувати й одержати звіт у графічному виді об'єктів тривимірних даних деталі або складеного виробу.

Існує спеціалізоване програмне забезпечення для різних виробництв. Наприклад, CAM2 Automotive розроблено з урахуванням специфічних потреб машинобудівної промисловості. КВМ FARO також здатний працювати із програмним забезпеченням інших фірм, таким як Prelude Inspection, PC-DMIS, PowerINSPEC, HOLOS тощо.

Конструкція FARO і програмне забезпечення CAM2 передбачає використання КВМ одним оператором.

Зручний дизайн, можливість температурної компенсації результатів вимірів, вібростійкість, несприйнятливості до ударів, а також наявність безперебійного джерела, що перезаряджає, живлення від FARO Powerhouse (працює до 8 ч без підзарядки) сприяють успішному використанню FARO у твердих цехових умовах виробництва.

Маса маніпуляторів FARO залежно від виконання коливається від 5 до 10 кг; упакування являє собою зручний кейс, що дозволяє перевозити КВМ вручну без використання якого-небудь додаткового встаткування.

Проблему обмеженості радіуса дії КВМ FARO при аналізі крупногабаритних деталей, наприклад штампа або зварювального кондуктора, можна вирішити декількома способами:

- використати вимірювальну «руку» з максимальним радіусом дії;
- застосувати напрямні прецизійні рейки, які мають довжину від 2 до 3 м;
- використовувати пристрої, за допомогою яких можна вимірювати об'єкти необмеженого розміру. Спочатку машина прив'язується до однієї частини вимірюваного виробу (по базах або ітеративно). Для того, щоб пересунути КВМ і продовжити вимір у раніше недоступній зоні, вимірюються та зберігаються кілька крапок (три й більше). Далі, після «стрибка», машина прив'язується до цих крапок, тим самим поєднується система координат з попередньої, і виміри тривають. Таких «стрибків» може бути необмежена кількість, причому по всіх координатах системи. Це дозволяє здійснювати



контроль та вимірювання в самих важкодоступних ділянках деталі (або складеного виробу), а також здійснювати вимірювання настільки складні, які реалізувати іншими методами вкрай трудомістко або взагалі неможливо;

- використовувати для виміру у важкодоступних місцях великий набір щупів - як крапкових, так і кулькові, різної довжини й форми.

Проте, слід зазначити, що застосування виключно механічних вимірювальних наконцевиків призводить до певного обмеження, як показано вище, при контрольно-вимірювальних операціях у процесі механічної обробки деталей, контролі їх якості та дотримання відповідних стандартів при виготовленні деталей. Потрібно застосовувати контрольно-вимірювальні оптико-електронні прилади, які підвищують якість виготовлення, продуктивність промислового виробництва [4.13 – 4.18]. Тому компанія FARO Technologies, Inc. спеціально для виміру лінійних розмірів великогабаритних виробів (від 0 до 30 м), наприклад в авіаційній промисловості й суднобудуванні тощо, випустила новий автоматизований лазерний прилад LaserTracker (рис.4.10).



Рис. 4.10. Контроль великогабаритних виробів за допомогою приладу Laser Tracker

Даний прилад має високу точність виміру (кутова точність треккера 0,018 мм + 0,003 мм на кожен метр до об'єкта, точність інтерферометра 0,001 мм + 0,0008 мм на кожен метр до об'єкта) при швидкості зняття даних до 1000 крапок у секунду.

Засади роботи приладу Laser Tracker полягають у отриманні відбитого лазерного променя від невеликого призменного відбивача. Спочатку відбивач установлюється на приладі для захвата луча лазера, потім оператор переміщає відбивач на об'єкт, який контролюють, при цьому прилад Laser Tracker автоматично стежить за метою. При необхідності оператор здійснює фіксацію поточних координат вимірюваного об'єкта за допомогою дистанційного пульта керування або голосом.

Спеціальні чутники постійно стежать за станом навколишнього середовища й вносять корективи в результат виміру. Немаловажно, що Laser Tracker працює з тим же програмним забезпеченням і виконує всі ті ж операції, що й вимірювальної «руки» KBM FARO. Отже, ідеальною схемою є застосування обох приладів, коли великогабаритні розміри контролюються за допомогою приладу Laser Tracker, а локальні - за допомогою рук.

Для збільшення точності виміру, а також для спрощення процесу сканування й зворотного інжинірингу рекомендується разом з вимірювальними «руками» KBM FARO використати безконтактні лазерні сенсори фірми Kreon Technologies (Франція) (рис. 4.11), що дають точність до  $\pm 0,015$  мм.



Рис. 4.11. Лазерний сканер для вимірювання геометричних параметрів деталей при механічній обробці

Комплексне використання даного вимірювального устаткування у механічній обробці матеріалів істотно спрощує процес вимірювань та підвищує якість готового виробу, особливо, якщо потрібні висока точність геометричних розмірів. Наприклад, для сканування такої досить крупногабаритної деталі, як турбінна лопатка, за допомогою KBM FARO необхідно витратити близько 3-4 годин, застосування FARO спільно зі сканером Kreon дозволяє скоротити час зняття даних до 20-30 хвилин, при цьому збільшується точність й усувається можливість механічного ушкодження поверхні деталі під час вимірювань.

Принцип роботи лазерного сканера наступний: він встановлюється замість контактної щупа та підключається до KBM мобільного або стаціонарного типу, або до верстата із числовим програмним керуванням (ЧПК). Технологія сканування такими приладами базується на методі тріангуляції. Кут між камерою й лазерним променем обраний оптимальним для сканування (рис. 4.12). При куті  $0^\circ$  між променем і вимірюваною поверхнею камера не фіксує випромінювання рядка, освітленої випромінюванням лазерного джерела на вимірюваній поверхні деталі,  $90^\circ$  - оптимальне положення.

Лазерний промінь у певний момент часу утворює на скануємій поверхні світну крапку, що фіксується матрицею відеокамери модулю фотореєстрації оптико-електронного приладу. У пристрої лазерного сканера розташовується цифрова відеокамера й діодний лазерний випромінювач із модуляцією сигналу.

Лазерний промінь формує рядок різної довжини залежно від моделі, а потім гасне до початку наступної. Максимальна кількість складає 60 рядків у секунду. Даний параметр регулюється вручну й задається залежно від відбивної здатності поверхні скануємого виробу.

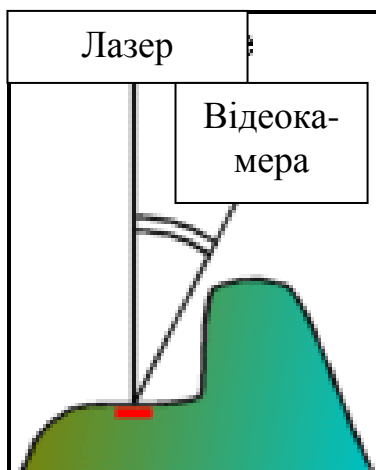


Рис. 4.12. Загальна схема сканування поверхні деталі при вимірюванні геометричних параметрів

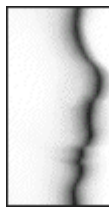
При формуванні променем лазера рядка на вимірюваній поверхні, на матриці фіксується розмита (градієнтна) крива, що потім фільтрується по крапках з максимальною інтенсивністю світлового зображення. Із цих крапок з

максимальною інтенсивністю формується «хмара», яка призначена для моделювання деталі, що вимірюється.

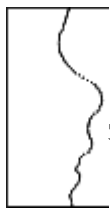
У цей час розроблено три типорозміри сенсорів для рішення різних виробничих завдань.

Відсканований об'єкт може бути експортованим у формати: IGS, VDA, DXF, STL, WRL, CBK, CWK, GRK, ASC, BMP для подальшої обробки. Так, можна спостерігати стадії формування моделі та суто контрольнo-вимірювального процесу визначення якості деталі. У наступній таблиці показані стадії обробки оптичного зображення, отриманого за допомогою автоматизованого лазерного скануючого приладу.

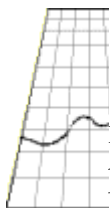
Табл. 4.1. Стадії формування моделі та суто контрольнo-вимірювального процесу визначення якості деталі



Неопрацьоване відеозображення



Оцифроване зображення. Електронна система фільтрує зображення й залишає тільки самі "яскраві" крапки.



Внаслідок калібрування камери визначається залежність між відеозображенням і дійсній метричній системі координат (UV). У результаті створюється лінія з крапок на площині



Знаючи позицію сканера щодо об'єкта, електроніка визначає положення крапок лінії в тривимірній системі координат (XYZ). Зібрані площини із крапками утворюють «хмару» з крапок.

Далі за допомогою програмного забезпечення по отриманій «хмарі» крапок будується 3D-поверхня деталі (рис. 4.13, рис. 4.14).

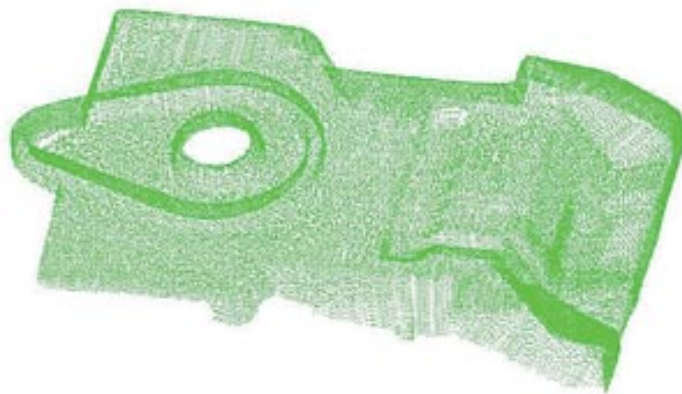


Рис. 4.13. Відсканована «хмара» крапок



Рис. 4.14. Готова CAD-модель

За допомогою лазерних головок фірми Kreon (рис. 4.15) можна з великою ефективністю робити цілу низку робіт, таких як інспекція, зворотній інжиніринг, швидке створення прототипів тощо в автоматизованому режимі роботи.

Застосування подібних лазерних автоматизованих приладів дозволяє значно підвищувати продуктивність машинобудівної та приладобудівної промисловості.

Лазерні сканери можна використовувати у сучасному механообробному виробництві разом з координатно-вимірювальними машинами, як мобільними, так і стаціонарними, типів FARO, MORA, STIEFEL MAYER, ROMER CIMCORE, RENAULT SEIV, CMA, ZETT MESS, MFO, CE JOHANSSON, GARDA, COORD, SHEFFIELD, BROWN & SHARPE, SCS, TRI – DAX, ZEISS, WENZEL, TOKIO BOEKI, DEA, TRI-MESURE.

Лазерні сканери можна використати спільно з верстатами з ЧПК типів: FIDIA, FORESTLINE, HEIDENHAIN, MAZAK, CMS, ZAYER, DECKEL MAHO, CHARLYROBOT, FANUC, JOBS, RENAULT AUTOMATION, GAMBIN, BRIDGEPORT.





Рис. 4.15. Лазерний сканер Kreon на KBM FARO

Досвід експлуатації даного встаткування показує високу ефективність його застосування в наступних сферах:

- при проведенні контрольно-вимірювальних робіт;
- при проведенні пуско-налагоджувальних робіт;
- швидке створення прототипів;
- дизайн;
- мультиплікація тощо.

Отже, використання координатно-вимірювальних машин та автоматизованих лазерних сканерів для безконтактної реєстрації інформації, наприклад, автоматизованих лазерних чутників, дозволяє значно скоротити терміни, що необхідні для проектування нових, а також модернізації виробів, що випускають серійно, досягти високої точності проведення контрольно-вимірювальних робіт, а також значно скоротити час і знизити витрати на проектування та виготовлення контрольних пристосувань.

#### **§ 4.2. Система контролю позиціювання та зносу різального інструмента на металообробних верстатах**

Вкрай актуальною проблемою сучасного виробництва є контроль позиціювання та зносу різального інструмента на металообробних верстатах з ЧПК. Рішення цієї задачі у гнучкому режимі роботи технологічного обладнання може призвести до підвищення якості виготовлення надточних

деталей приладів, запобігти аварійним ситуаціям під час технологічного процесу. Тому створення таких приладів контролю вирішує важливу задачу промислового металообробного підприємства.

Одним з найбільш точних методів прямого вимірювання є дифракційний метод вимірювань зносу різальної крайки, позиціонування інструмента в складі ТОС. На цьому методі заснований принцип дії лазерного приладу, розробленого на кафедрі виробництва приладів НТУУ "КПІ" [4.34].

Оптична система (рис. 4.16) лазерного чутника містить He-Ne-лазер, першу поворотну призму, щілинну узкопольную діафрагму, вимірювальну щілину, що сформована додатковою опорною напівплощиною і верхівкою різального клину інструмента, обертає прямокутну призму, другу поворотну призму, Фур'є-об'єктив.

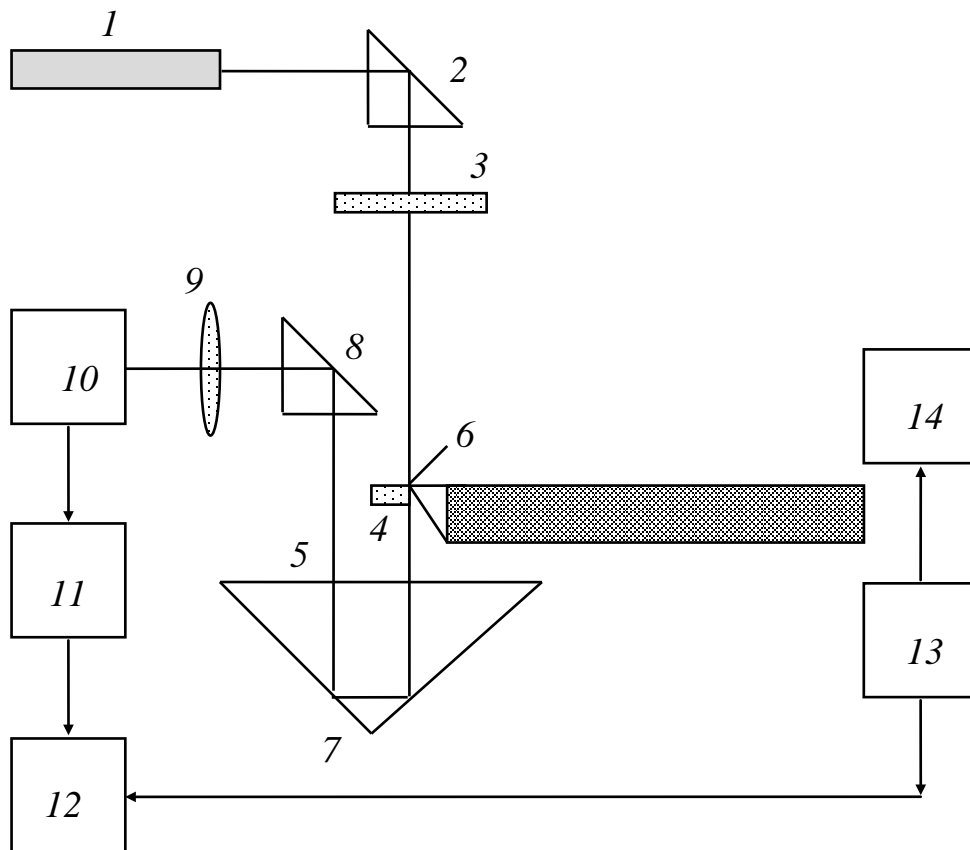


Рис. 4.16. Структурна схема лазерного пристрою вимірювання зносу різального інструмента: 1 - лазер, 2, 7, 8 - призми, АЦП, 3 - діафрагма, 4 - вимірювальна щілина, 5 - опорна напівплощина, 6 - різальний інструмент, 9 - Фур'є-об'єктив, 10 - блок фотореєстрації на основі ПЗЗ, 11 - АЦП, 12 - стійка CNC верстата, 13 - сервопривод верстата, 14 - суппорт верстата

У задній фокальній площині Фур'є-об'єктиву розташований блок фотореєстрації на основі лінійного ПЗС-приймача зображень. Вихід ПЗС-приймача підключений через АЦП до блоку CNC токарного верстата (виходи CNC сполучені з виконавчими механізмами ТОС). Центр проекції діафрагми на площину щілини суміщений з її центром, причому велика її сторона орієнтована по нормалі до робочої крайки опорної напівплощини, зверненої до верхівки різального клину інструмента.

Перед початком обробки інструмент в супорті верстата переміщують у вихідну нульову позицію. Пучок випромінювання лазера, повертаючись призмою, прямує на щілинну діафрагму. Формується світловий пучок прямокутної форми розмірами  $40...200 \div 3000...5000$  мкм, який дифрагує на вимірювальній щілині.

Дифрагований пучок повертається і спрямовується призмами у Фур'є-об'єктив, який формує дифракційне зображення щілини на фоточутливих елементах в задній фокальній площині об'єктиву. Вихідний сигнал ПЗС-приймача зображень перетворюється АЦП в дискретний сигнал і надходить в стійку CNC верстата для формування команд керування виконавчими органами металорізального обладнання.

Алгоритм обробки сигналів, сформованих оптичною системою лазерного чутника, дозволяє визначати знос різальної крайки інструмента відповідно ньому здійснювати корекцію траєкторії верхівки різального інструмента, підвищуючи точність контролю якості формоутворення прецизійних деталей.

Проте застосування такого пристрою контролю якості процесу обробки обмежене умовами реального технологічного процесу: наявністю стружки, наростів, туманними утвореннями мастильно-охолоджувальної технологічної рідини в навколишньому середовищі, вібраційними перешкодами тощо.

#### **§ 4.3. Автоматизований оптичний контроль періодичних просторових структур**

В останні роки спостерігається бурхливий розвиток когерентної фур'є-оптики й широке використання її досягнень для рішення практичних завдань. Розвиток когерентної фур'є-оптики призвело до створення унікальних за своїми можливостями і продуктивністю когерентних оптичних систем обробки інформації (ОСОІ) [4.35].

Основною структурною одиницею багатьох таких систем є когерентний оптичний спектроаналізатор [4.36], на основі якого розроблено низку високоточних лазерних дифракційних вимірювачів товщини дроту, тонких валів, світловодів [4.37] і параметрів мікродефектів оброблених поверхонь металів. Автоматизація цих систем є важливою задачею підвищення якості виготовлення надточних деталей для НВЧ-приладів та інших типів радіоелектронної апаратури (див. розд. 1).

Засади контролю та вимірювання періодичних структур були викладені у розд.1.



Досліджуваною структурою в авторських експериментальних роботах [4.38] щодо автоматизації вимірювань були деталі типу одномірної просторової квазіперіодичної ґратки (рис. 4.17).

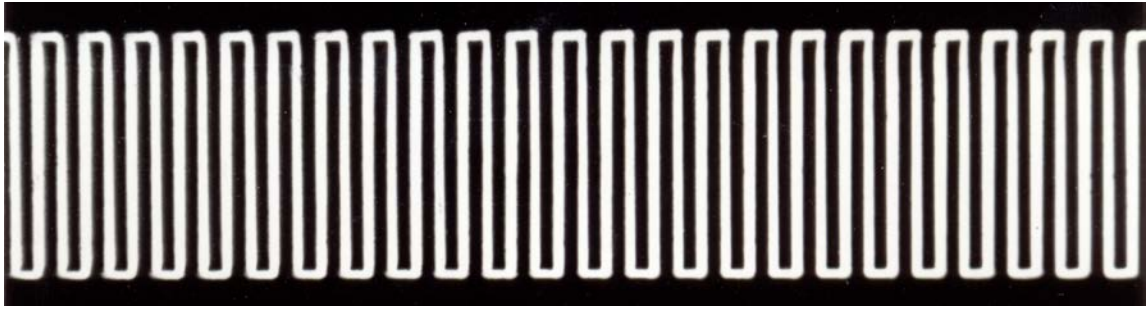


Рис. 4.17. Фотографія просторової квазіперіодичної структури

Ці структури широко використовуються в електровакуумних приладах для керування електронними пучками. Ґратка складається із прозорих щілин шириною  $b_x$  и непрозорих стінок шириною  $a_x$ . Оскільки ширина стінок  $a_x$  і щілин  $b_x$  є випадковими величинами через різні технологічні похибки, що виникають у процесі виготовлення ґраток, основними їхніми характеристиками будуть середні значення  $\bar{a}_x$  і  $\bar{b}_x$  і середні квадратичні відхилення  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$ .

За допомогою вимірювального мікроскопа були виконані статистичні дослідження розмірів  $a_x$  і  $b_x$  партії ґраток. У наслідок цих досліджень встановлено, що параметри  $\bar{a}_x$  і  $\bar{b}_x$  даної партії ґраток залишаються практично постійними й рівними 100 мкм.

Окрім того, у всіх ґратках цієї партії величина  $\sigma_a$  також є постійними й рівної 9 мкм; величинами  $\sigma_b$  змінюється в межах 6—25 мкм у різних ґратках, що викликано механічними деформаціями їхніх стінок у процесі виготовлення; розподіл розмірів  $a_x$  і  $b_x$  у всіх ґратках підлягає нормальному закону розподілу:

$$\psi(a_x) = \frac{1}{\sigma_a \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(a_x - \bar{a}_x)^2}{2\sigma_a^2}}, \quad \psi(b_x) = \frac{1}{\sigma_b \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b_x - \bar{b}_x)^2}{2\sigma_b^2}}$$

з характеристичними функціями

$$\theta_a(f_x) = e^{-2\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2} \cdot e^{j2\pi f_x \bar{a}_x}, \quad (4.6)$$

$$\theta_b(f_x) = e^{-2\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2} \cdot e^{j2\pi f_x \bar{b}_x}, \quad (4.7)$$

де  $f_x$  – просторова частота.

Якщо таку просторову структуру помістити у вхідній площині когерентного оптичного спектроаналізатора, то в площині спектрального аналізу формується просторово-частотний амплітудно-фазовий спектр структури, що являє собою її дифракційне зображення [4.36]:

$$U(f_x, f_y) = k \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(x, y) e^{-j2\pi(xf_x + yf_y)} dx dy, \quad (4.8)$$

де  $k$  — коефіцієнт, що залежить від параметрів спектроаналізатора;

$T(x, y)$  — комплексний коефіцієнт пропущення досліджуваної структури;

$f_x$  і  $f_y$  — просторові частоти спектра.

При реєстрації спектра квадратичними фоторегістраторами (ФЕУ, фотодіод тощо), чутливими не до амплітуди, а до інтенсивності випромінювання, вимірюється енергетичний спектр  $W(f_x, f_y)$  Вінера досліджуваного сигналу, рівний

$$W(f_x, f_y) = U(f_x, f_y) U^*(f_x, f_y), \quad (4.9)$$

тобто квадрату амплітудного спектра.

Теоретично форма енергетичного спектра Вінера просторової квазіперіодичної структури можуть бути визначена внаслідок рішення задачі про дифракцію когерентної світлової хвилі. Однак подібні завдання є надзвичайно складними. Тому в оптику для їхнього рішення застосовують методи теорії статистичної радіотехніки [4.39] заміною оптичних сигналів аналогічними їм за формою електричними. Так, аналогом щілини в оптиці є прямокутний електричний імпульс, у радіотехніці аналогом дифракційної ґратки може бути періодична послідовність електричних прямокутних імпульсів і т.п. Відповідно до наведених прикладів, як фізичний аналог просторової одновірної квазіперіодичної структури була використана аперіодична послідовність електричних прямокутних імпульсів  $A$ . При цьому амплітуда  $A$  імпульсів дорівнює інтенсивності когерентної світлової хвилі у вхідній площині спектроаналізатора; щілина просторової структури представлена імпульсом тривалістю  $b_x$ , оскільки вона прозора для світла, а стінка — паузою між імпульсами, по тривалості рівній ширині  $a_x$ .

В роботі [4.39] показано, що енергетичний спектр Вінера такої послідовності імпульсів, а отже, і просторової структури, описується виразом

$$W(f_x) = \frac{A^2}{4\pi^2 f_x^2 (\bar{a}_x + \bar{b}_x)} \operatorname{Re} \frac{(1 - \theta_a(f_x))(1 - \theta_b(f_x))}{1 - \theta_a(f_x)\theta_b(f_x)}. \quad (4.10)$$

Підставляючи (4.6) і (4.7) в (4.10), одержимо

$$W(f_x) = \frac{A^2}{4\pi^2 f_x^2 (\bar{a}_x + \bar{b}_x)} \operatorname{Re} \times \frac{\left(1 - e^{-\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2} e^{j2\pi f_x \bar{a}_x}\right) \left(1 - e^{-\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2} e^{j2\pi f_x \bar{b}_x}\right)}{1 - e^{-\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2} e^{j2\pi f_x \bar{a}_x} e^{-\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2} e^{j2\pi f_x \bar{b}_x}}. \quad (4.11)$$

Це вираз являє собою комплексний дріб, визначивши речовинну частину якої, енергетичний спектр Вінера можна описати так:

$$W(f_x) = \frac{A^2}{4\pi^2 f_x^2 (\bar{a}_x + \bar{b}_x)} \frac{sh2\pi^2 f_x^2 (\sigma_x^2 + \sigma_b^2) - sh2\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2 \cos 2\pi f_x \bar{b}_x - sh2\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2 \cos 2\pi f_x \bar{a}_x}{ch2\pi^2 f_x^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - \cos 2\pi f_x (\bar{a}_x + \bar{b}_x)}. \quad (4.12)$$

Аналіз виразу (4.11) виконаний на ПЕОМ чисельними методами. При цьому параметри  $\bar{a}_x$ ,  $\bar{b}_x$  і  $\sigma_a$  були прийняті величинами постійними, а  $W(f_x)$  розраховано для декількох значень  $\sigma_b$ .

Результати обчислень представлені на рис. 4.18, з якого видно, що функція  $W(f_x)$  є періодичною й має максимуми на кратних частотах  $f_x^m$ , рівних

$$f_x^m = \frac{m}{a_x + b_x}, \quad (4.13)$$

де  $m = 0, 1, 2, \dots$  – номер максимуму.

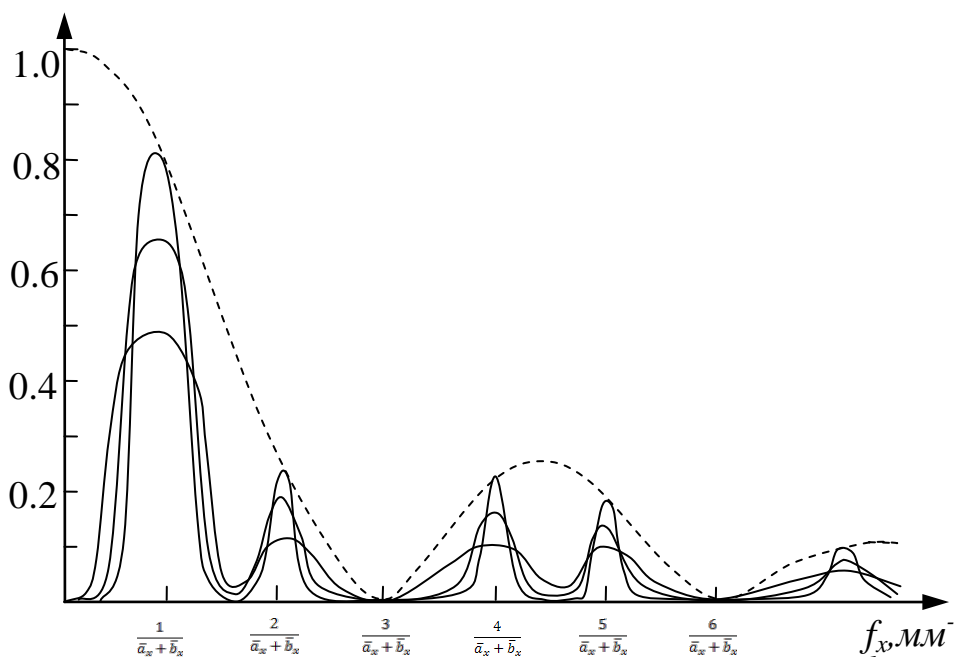


Рис. 4.18. Енергетичний спектр Вінера квазіперіодичного структури при зміні середнього квадратичного  $\sigma_b$  відхилення, ширини щілин;  $\sigma'_b \langle \sigma''_b \rangle \langle \sigma'''_b \rangle$

Амплітуди всіх максимумів з ростом  $\sigma_b$ , зменшуються, а ширина збільшується. Все це дозволяє вказати низку методів визначення параметрів квазіперіодичної структури по її енергетичному спектрі Вінера за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора.

Так, вибираючи певний максимум спектра  $m$  і вимірюючи відстань  $f_x^m$  до нього від нульового максимуму, можливо згідно (4.13) знайти величину середнього періоду  $\bar{P}_x = \bar{a}_x + \bar{b}_x$  квазіперіодичної структури. Середнє

квадратичне відхилення  $\sigma_b$  ширини щілин  $b_x$  можна визначити двома методами: амплітудним і частотним.

При амплітудному методі аналізу фотоелектрична вимірювальна система спектроаналізатора визначає відношення амплітуд двох максимумів спектра, тобто

$$\alpha_{ij}(\sigma_b) = \frac{W_i(f_x^m, \sigma_b)}{W_j(f_x^m, \sigma_b)}, \quad (4.14)$$

де  $W_i(f_x^m, \sigma_b)$  і  $W_j(f_x^m, \sigma_b)$  – амплітуди  $i$ -го й  $j$ -го максимумів спектра відповідно.

Дослідження функції  $\alpha_{ij}(\sigma_b)$  показали, що в певній області значень вона лінійно залежить від  $\sigma_b$ . Величина області лінійності  $\alpha_{ij}(\sigma_b)$  залежить від співвідношення параметрів  $\bar{a}_x$ ,  $\bar{b}_x$  і  $\sigma_a$  досліджуваної структури. Вимір відношення амплітуд двох максимумів спектра, а не абсолютного значення амплітуди будь-якого максимуму дозволяє виключити вплив на результат вимірів випадкові флуктуації інтенсивності  $A$  випромінювання у вхідній площині спектроаналізатора. Ці флуктуації виникають через нестабільність роботи лазерного спектроаналізатора.

При частотному методі аналізу фотоелектрична вимірювальна система визначає відношення ширини двох обраних максимумів спектра на відповідному рівні, тобто

$$\beta_{ij}(\sigma_b) = \frac{\Delta f_x^i}{\Delta f_x^j}, \quad (4.15)$$

де  $\Delta f_x^i$  і  $\Delta f_x^j$  — ширина  $i$ -го і  $j$ -го максимумів спектра.

Функція  $\beta_{ij}(\sigma_b)$  у певній області значень  $\sigma_b$  також носить лінійний характер. Вимір відносини ширини двох максимумів спектра також дозволяє позбутися від нестабільності роботи лазера.

Кожний з розглянутих методів має власні переваги й недоліки. При частотному методі аналізу необхідне сканування спектра, чого не потрібно при амплітудному методі. Для сканування спектра потрібно мати додатковий скануючий пристрій. Проте точності можливості частотного методу значно вище, ніж амплітудного.

Зазначені методи аналізу геометричних параметрів квазіперіодичних структур були перевірені за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора (рис. 4.19). Як джерело когерентного випромінювання використаний He-Ne лазер, що працює в одномодовому режимі ( $P_{\text{вих}} = 10$  мВт,  $\lambda = 0,6328$  мкм). Оптико-електронну систему сканування й виміру спектра розташовано на мікрометричному столику (відлік по шкалі 10 мкм). Реєстрацію сигналів на виході оптичної системи здійснено фотоприймальним пристроєм, що містить каскади попереднього підсилення, підсилення вихідного сигналу. Шуми описаної системи становили 7 мВ, а відношення сигнал/шум досягало

200 одиниць. Система показала надійні й стабільні результати в межах 5% протягом декількох місяців роботи.

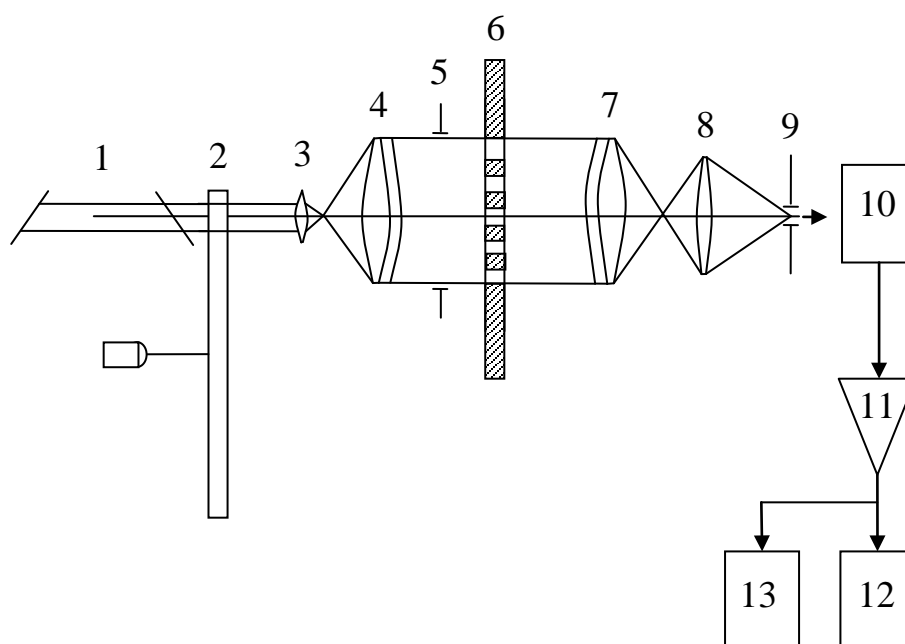


Рис. 4.19. Принципова схема експериментального обладнання: 1 – лазер, 2 – модулятор, 3, 4 – коліматор Кеплера, 5 – апертурна діафрагма, 6 – досліджувана ґратка, 7 – фур'є-об'єктив, 8 – лінза для зміни масштабу спектра, 9 – польова діафрагма діаметром 70 мкм, 10 – фотоприймач, 11 – попередній підсилювач, 12 – мілівольтметр, 13 – осцилограф

За допомогою описаної установки експериментально отримані залежності  $\alpha_{ij}(\sigma_b)$  і  $\beta_{ij}(\sigma_b)$ , які наведені на рис. 4.20, а і б, та повністю збігаються з теоретичними результатами, що підтверджує достовірність пропонованих методів та їх повну придатність у реальному приладобудівному виробництві.

Отже, наведені результати досліджень дозволяють за допомогою когерентного оптичного спектроаналізатора автоматично виконувати діагностику геометричних параметрів квазіперіодичних структур. Вони можуть бути використані для побудови автоматичних метрологічних систем у надточному приладобудуванні.

У сучасному оптичному приладобудуванні, а також у НВЧ пристроях поширення одержали різні штрихові періодичні структури, подібні оптичним дифракційним ґраткам [4.40, 4.41]. Оскільки технічні характеристики цих приладів багато в чому визначаються якістю виготовлення елементів структур, тобто їхніми геометричними розмірами, до процесу контролю структур пред'являються досить високі метрологічні вимоги. Використання лише

візуальних оптичних приладів (мікроскопів і епідіаскопів) значно знижує продуктивність процесу контролю.

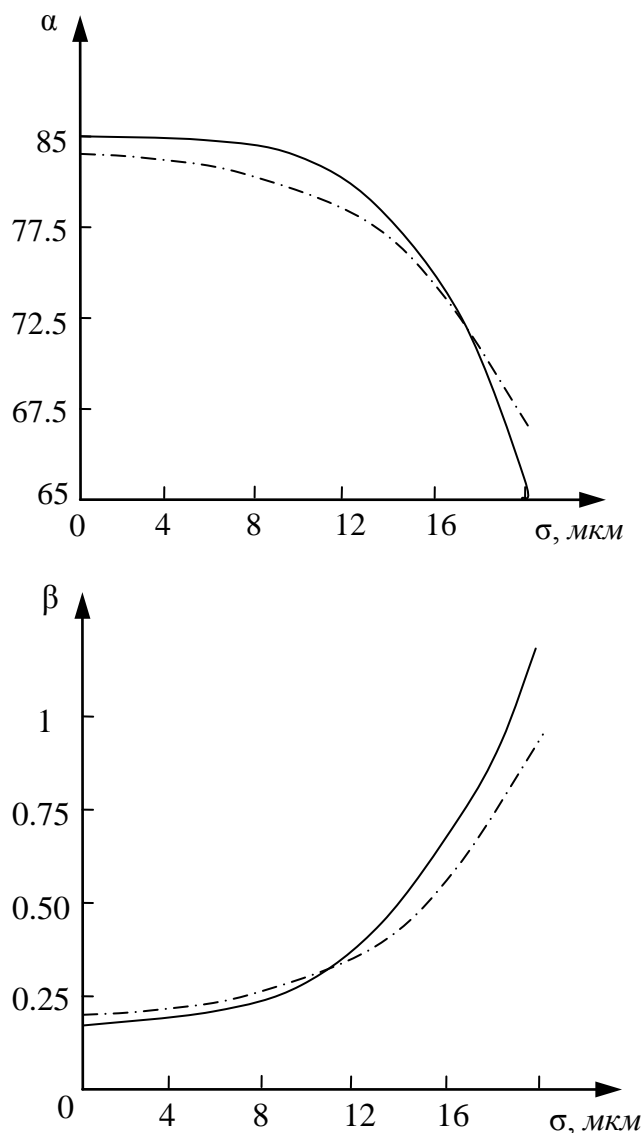


Рис. 4.20. Функціональні криві зміни параметрів  $\alpha_{12}$  і  $\beta_{12}$ : – теоретичні значення, – експериментальні залежності

Крім того, на якості контролю позначається рівень підготовки операторів-метрологів. Американською фірмою «Bugs» була почата спроба автоматизувати цей процес за допомогою вимірювального автомата, виконаного на основі фотоелектричного мікроскопа [4.42, 4.43]. Проте розроблений фірмою прилад так і не одержав промислового застосування внаслідок складності його конструкції й обмежених функціональних можливостей.

На нашу думку найбільш перспективними для автоматизації виміру й контролю статистичних характеристик різних двовимірних і одновимірних квазіперіодичних структур є когерентні оптичні спектроаналізатори (КОС) [4.38, 4.44].

Ґрунтуючись на результатах роботи [4.44], де отримані аналітичні залежності, що описують просторово-частотний енергетичний спектр штрихової квазіперіодичної структури, формований у площині спектрального аналізу КОС, розглянемо конкретні методи й алгоритми їхньої апаратурної реалізації для автоматизації контролю статистичних характеристик одновимірних квазіперіодичних структур.

Через різні технологічні похибки виготовлення штрихова структура, наведена на рис. 4.21, є квазіперіодичною, оскільки розміри її елементів мають випадкові відхилення від номінальних значень. Тому статистичні характеристики геометричних розмірів такої структури при інтегральній оцінці можуть бути описані середніми розмірами  $\bar{a}_x$  і  $\bar{b}_x$  ширини щілин і стінок, а також середніми квадратичними відхиленнями (СКО)  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$  від них. У тій же роботі [4.44] показано, що перетин енергетичного спектра амплітудного коефіцієнта  $t(x,y)$  квазіперіодичної структури при  $f_x = 0$  описується аналітичною залежністю

$$W(f_x) = \frac{E_0 d^2}{2\pi^2 f_x^2 (\bar{a}_x + \bar{b}_x)} \times \frac{sh 2\pi^2 f_x^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - \cos 2\pi \bar{a}_x f_x sh 2\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2 - \cos 2\pi \bar{b}_x f_x sh 2\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2}{ch 2\pi^2 f_x^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - \cos 2\pi f_x (\bar{a}_x + \bar{b}_x)}, \quad (4.16)$$

яка для симетричної структури з  $\bar{a}_x = \bar{b}_x$  може бути спрощена:

$$W(f_x) = \frac{E_0 d^2}{4\pi^2 f_x^2 \bar{a}_x} \times \frac{sh 2\pi^2 f_x^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - \cos 2\pi \bar{a}_x f_x (sh 2\pi^2 f_x^2 \sigma_a^2 + sh 2\pi^2 f_x^2 \sigma_b^2)}{ch 2\pi^2 f_x^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - \cos 4\pi \bar{a}_x f_x}, \quad (4.17)$$

де  $f_x$  – просторова частота;

$E_0$  – освітленість квазіперіодичної структури;

$d$  – висота штрихів.

Аналіз вираження (4.17), виконаний чисельними методами за допомогою ЕОМ показав, що функція  $W(f_x)$  містить екстремуми на кратних частотах  $f_m^x$  тобто

$$f_x^m = \frac{m}{2a_x}, \quad (4.18)$$

де  $m = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7 \dots$  – порядковий номер максимуму.

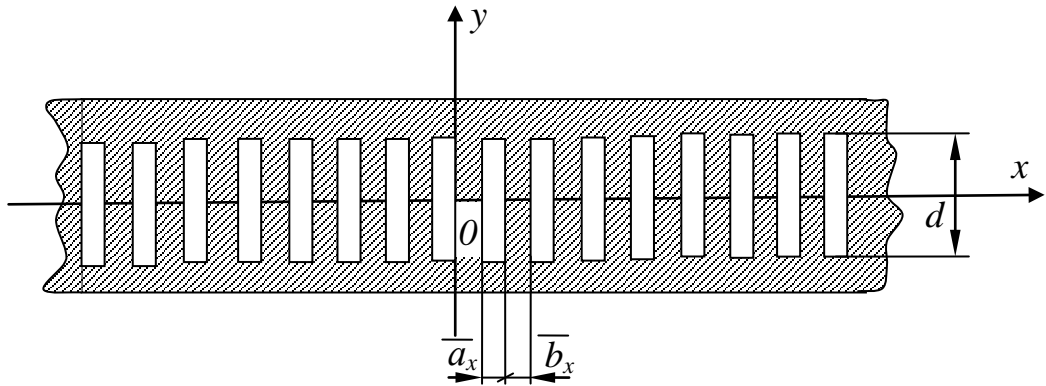


Рис. 4.21. Фрагмент штрихової квазіперіодичної структури

При цьому амплітуди максимумів описуються залежністю, що одержимо, підставивши (4.18) в (4.17) і виконавши низку алгебраїчних перетворень:

$$W(m, \sigma_a, \sigma_b) = \frac{E_0 d^2 \bar{a}_x}{\pi^2 m^2} \frac{1}{th\left(\frac{\pi m \sigma_a}{2 \bar{a}_x}\right)^2 + th\left(\frac{\pi m \sigma_b}{2 \bar{a}_x}\right)^2}. \quad (4.19)$$

Крім того, з підвищенням СКО  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$  амплітуди максимумів зменшуються, ширина ж їх збільшується, тобто максимуми «розмиваються», а спектр структури трансформується з дискретного в суцільний; з ростом середнього періоду  $\bar{p}_x = \bar{a}_x + \bar{b}_x$  структури відстань між максимумами зменшується.

На основі встановлених закономірностей поведіння спектра  $W(f_x)$  запропоновано три нових методи автоматизації контролю статистичних характеристик  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$  квазіперіодичної структури, у яких інформативними параметрами є величини амплітудних складових окремих максимумів спектра на екстремальних частотах  $f_x^m$ ; ширина максимумів спектра на складових рівнях; функціональне співвідношення амплітуд і ширини максимумів. Просторове положення окремих максимумів спектра або відстань між ними дозволяє знайти середній період  $p_x = \bar{a}_x + \bar{b}_x$  структури.

При амплітудному методі контролю СКО  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$  необхідно вимірювати амплітуду окремих максимумів енергетичного спектра  $W(f_x)$  на частотах  $f_x^m$ . Для усунення впливу часової флуктуації вихідної потужності випромінювання лазера, тобто освітленості  $E_0$  аналізованої структури, на результат виміру запропоновано визначати величину відносини амплітуд двох довільних  $m$ -го і  $n$ -го максимумів спектра, що описується аналітичною залежністю



$$\alpha_{mn}(\sigma_a, \sigma_b) = \frac{W(m, \sigma_a, \sigma_b)}{W(n, \sigma_a, \sigma_b)} = \frac{n^2}{m^2} \frac{th\left(\frac{\pi n \sigma_a}{2a_x}\right)^2 + th\left(\frac{\pi n \sigma_b}{2a_x}\right)^2}{th\left(\frac{\pi m \sigma_a}{2a_x}\right)^2 + th\left(\frac{\pi m \sigma_b}{2a_x}\right)^2}. \quad (4.20)$$

Аналіз цього виразу за допомогою ПЕОМ показав, що функція  $\alpha_{mn}(\sigma_a, \sigma_b)$  при  $\sigma_a = \text{Const}$  є однозначною й монотонно спадаючою за збільшенням СКО  $\sigma_b$ , а крутість її підвищується з ростом індексу  $n$  при постійному  $m < n$ .

Варіант функціональної блок-схеми апаратурної реалізації алгоритму амплітудного методу наведений на рис. 4.22.

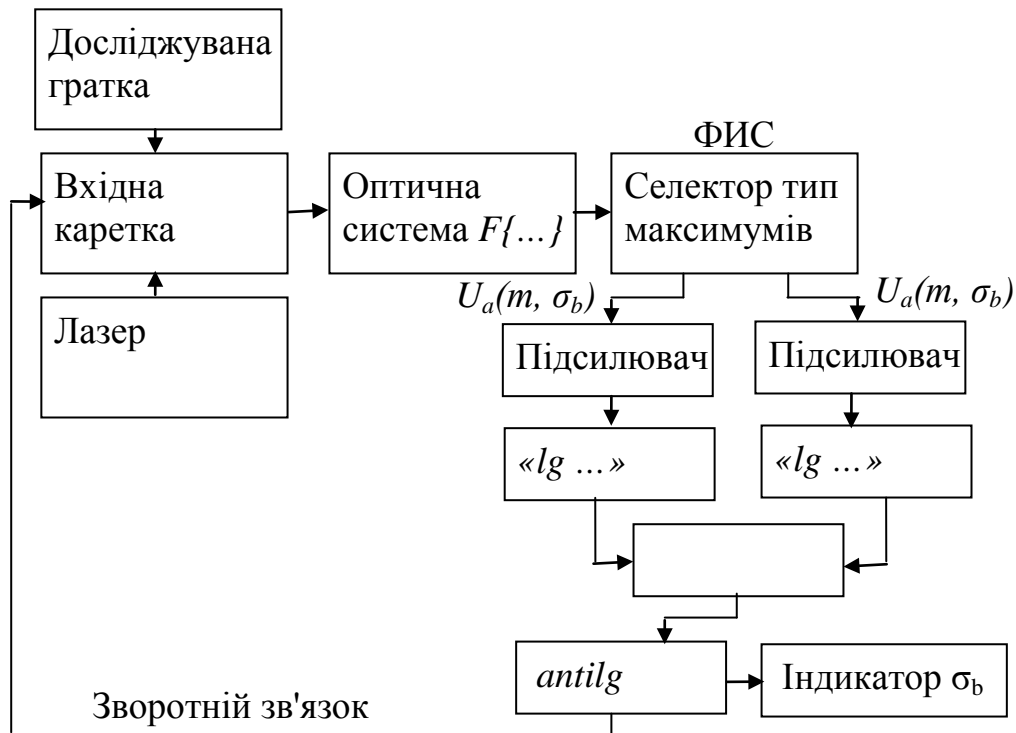


Рис. 4.22. Функціональна блок-схема апаратурної реалізації амплітудного методу контролю

Контрольовану структуру поміщають у вхідній площині КОС і за допомогою оптичної системи формують у площині спектрального аналізу її дифракційне зображення, розподіл освітленості в якому є енергетичним спектром структури [4.45].

Селектором, що представляє собою оптично непрозору маску, що містить дві щілинні діафрагми, виділяють амплітуди  $m$ -го й  $n$ -го максимумів спектра, які поканально реєструються двома фотодіодами, наприклад ФД-27К, підсилюються підсилювачами й надходять поканально на входи двох логарифматорів напруги.

Вихідна напруга логарифматора пропорційно логарифму вхідної напруги, тобто величині світлового потоку в центрі  $m$ -го й  $n$ -го дифракційних максимумів.

Вихідні напруги логарифматорів взаємно віднімаються й надходять на антилогарифматор, вихідна напруга якого, пропорційне відношенню амплітуд максимумів, надходить на індикатор параметра  $\sigma_b$ .

При контролі СКО  $\sigma_b$  по ширині спектральних максимумів на постійному рівні необхідно вимірювати ширину максимумів енергетичного спектра  $W(f_x)$  на рівнях, пропорційних  $k_a/m^2$ , де  $k_a$  – коефіцієнт рівня, що задає апаратно. Оскільки розподіл амплітуд спектра пропорційно освітленості  $E_o$  структури у вхідній площині КОС, для усунення впливу часових флуктацій вихідної потужності випромінювання лазера на результат виміру доцільно визначати величину відносини ширини двох довільних  $m$ -го й  $n$ -го максимумів, що описується аналітичною залежністю

$$\beta_{mn}(\sigma_a, \sigma_b) = \frac{\arccos \left[ \frac{R_c \left\{ sh \left( \frac{\pi m \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi m \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 - \right\}}{\sqrt{\left[ R_c \left\{ sh \left( \frac{\pi m \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi m \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 \right\} \right]^2 + 8R_u^2 - 8R_u \left[ R_c sh \left( \frac{\pi m \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - 8R_u ch \left( \frac{\pi m}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) \right]}}}{4R_u} \right]}{\arccos \left[ \frac{R_c \left\{ sh \left( \frac{\pi n \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi n \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 - \right\}}{\sqrt{\left[ R_c \left\{ sh \left( \frac{\pi n \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi n \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 \right\} \right]^2 + 8R_u^2 - 8R_u \left[ R_c sh \left( \frac{\pi n \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) - 8R_u ch \left( \frac{\pi n}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) \right]}}}{4R_u} \right]} \quad (4.21)$$

де  $R_c = E_0 d^2 \bar{a}_x$ ,  $R_\phi = \pi^2 k_a$ .

Аналіз вираження (4.21) також виконаний чисельними методами за допомогою ПЕОМ. Досліджена функція  $\beta_{mn}(\sigma_a, \sigma_b)$  є залежністю від висоти рівня виміру ширини максимумів, пропорційного коефіцієнту  $k_a$ .

Встановлено, що при  $k_a < 1,1$  функція  $\beta_{mn}(\sigma_a, \sigma_b)$  є однозначною й монотонно зростає, а крутість її, тобто чутливість методу, підвищується за збільшенням індексу  $n$  при  $m < n$ .

Один з варіантів функціональної блок-схеми апаратної реалізації алгоритму методу контролю за шириною спектральних максимумів на постійному рівні наведений на рис. 4.22. Досліджувану структуру також

поміщають у вхідній площині КОС, і формують її дифракційне зображення в площині спектрального аналізу.

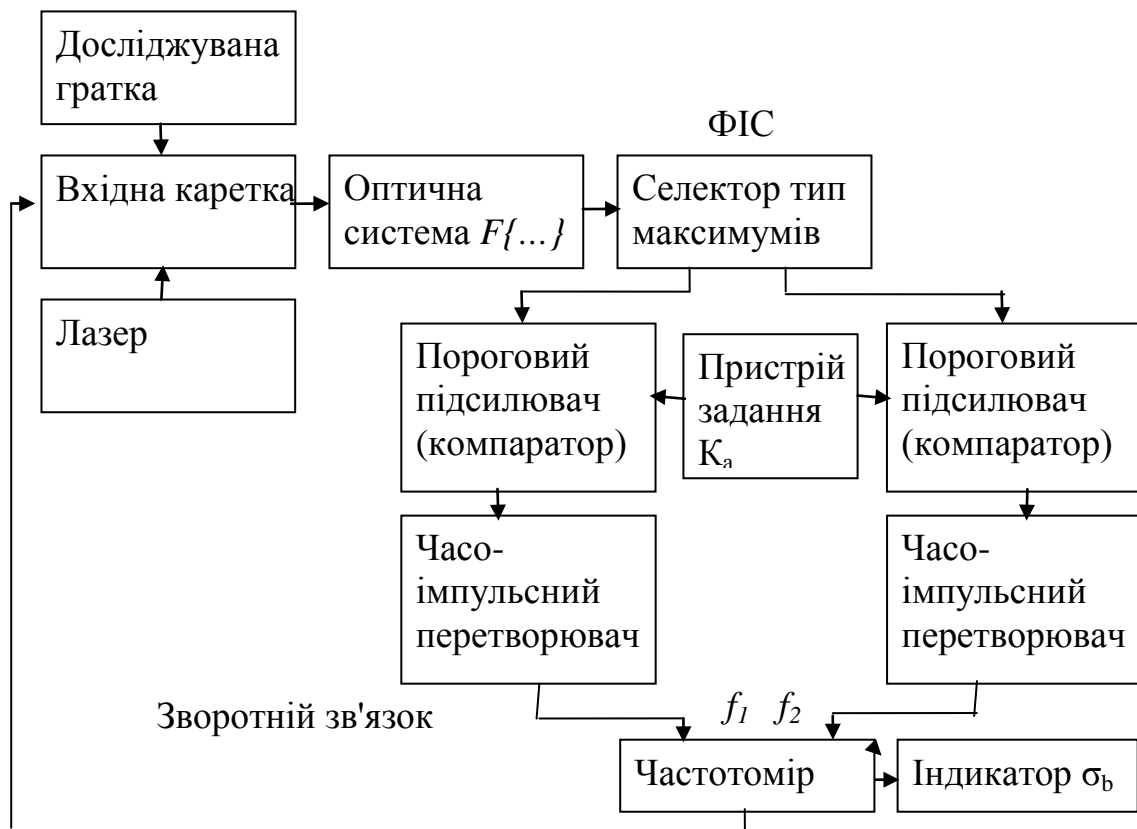


Рис. 4.22. Функціональна блок-схема апаратної реалізації методу контролю за шириною максимумів на постійному рівні

Для виміру ширини двох довільних  $m$ -го й  $n$ -го максимумів здійснюють їхнє сканування за двома статично встановленими фотоприймачами з вузькопольовою діафрагмою на вході. При періодичному скануванні довільного максимуму по діафрагмі на виході фотоприймачів генерується періодична послідовність імпульсів, частота проходження яких збігається із частотою сканування, а форма повторює розподіл освітленості в максимумі.

Вихідний сигнал кожного фотоприймача підсилюється граничними підсилювачами й обмежується по амплітуді до рівню визначення ширини максимумів.

Отже, на виході підсилювачів формуються усічені імпульси з нульовою крутістю фронту при верхівці; тривалість імпульсів пропорційна ширині максимумів на апаратно обраному рівні  $k_a$ .

Вихідні сигнали обох граничних підсилювачів поканально надходять на два часо-імпульсних перетворювачі, де реалізуються операція «тривалість імпульс-частота». Тобто на виході кожного перетворювача формується періодична послідовність прямокутних імпульсів, частота проходження яких пропорційна тривалості імпульсів вхідного сигналу.

Вихідні сигнали кожного перетворювача надходять на перший і другий входи частотоміра-хронометра, що працює в режимі  $f_1/f_2$  вимірювання відношення частот вхідних сигналів. Це відношення відображається на цифровому табло; воно пропорційно СКО  $\sigma_b$ .

За методом контролю СКО  $\sigma_b$  по ширині спектральних максимумів на змінному рівні необхідно вимірювати ширину довільного  $m$ -го максимуму енергетичного спектра структури на рівні, пропорційному потужності випромінювання лазера (освітленості  $E_0$  структури) і обернено пропорційно квадрату порядкового номера  $m$ -го максимуму.

Це дозволяє автоматично усунути вплив часових флуктуацій вихідної потужності випромінювання лазера на ширину  $m$ -го максимуму спектра, а рівняння методу контролю описати аналітичною залежністю

$$\gamma_m(\sigma_a, \sigma_b) = \frac{1}{\pi a_x} \arccos \frac{1}{4} sh \left( \frac{\pi m \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi m \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 - \sqrt{\left[ sh \left( \frac{\pi m \sigma_a}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 + sh \left( \frac{\pi m \sigma_b}{\sqrt{2a_x}} \right)^2 \right]^2 8 \exp \left[ - \left( \frac{\pi m}{2a_x} \right)^2 (\sigma_a^2 + \sigma_b^2) \right]}. \quad (4.22)$$

З аналізу виразу (4.22) встановлено, що функція  $\gamma_m(\sigma_b)$  при  $\sigma_a = \text{const}$  є монотонно зростаючою та однозначною. При цьому чутливість методу, що визначена її крутістю, залежить від порядкового номера  $m$ -го максимуму спектра й зростає за його збільшенням.

Функціональна блок-схема варіанту апаратної реалізації алгоритму методу контролю за шириною спектральних максимумів на змінному рівні наведена на рис. 4.23.

Досліджувану структуру також розташовують у вхідній площині КОС, формують її дифракційне зображення й сканують його  $m$ -й максимум по масці, що містить крапковий отвір.

Світловий потік, що пройшов через цей отвір, реєструється фотоприймачем, вихідний сигнал якого, пройшовши попередній підсилювач, надходить на вхід граничного підсилювача; рівень обмеження підсилювача автоматично встановлюється пропорційним вихідної потужності випромінювання лазера й амплітудного вольтметра.

Вихідна напруга амплітудного вольтметра постійна й пропорційна амплітуді імпульсів на його вході.

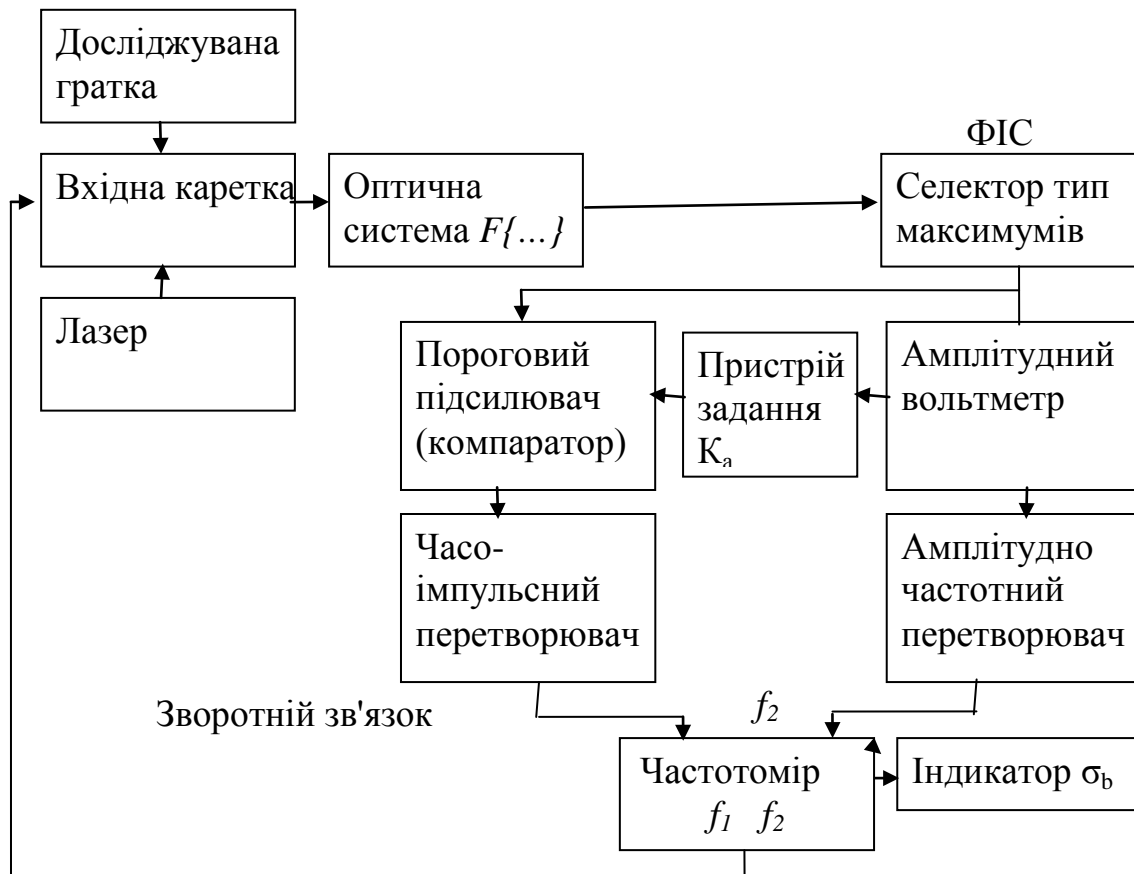


Рис. 4.23. Функціональна блок-схема апаратної реалізації методу контролю за шириною максимумів на змінному рівні

Як і в попередньому методі, вихідний сигнал граничного підсилювача перетвориться часово-імпульсним перетворювачем у періодичну послідовність прямокутних імпульсів, частота  $f_1$  проходження яких пропорційна ширині  $m$ -го дифракційного максимуму.

Вихідний сигнал амплітудного вольтметра перетворюється амплітудно-частотним перетворювачем у періодичну послідовність прямокутних імпульсів, частота  $f_2$  проходження яких пропорційна амплітуді  $m$ -го дифракційного максимуму. Обидва сигнали надходять на перший і другий входи частотоміра-хронометра, включеного в режим  $f_1/f_2$  від носія, що відображається на цифровому табло; це відношення пропорційно  $\sigma_b$ .

Порівняльний аналіз описаних методів контролю показав, що кращим є амплітудний метод, що має самий широкий діапазон вимірів і найбільш просту апаратну реалізацію.

Метод контролю за шириною максимумів на постійному рівні має найбільшу чутливість, але його апаратна реалізація складніша.

Найбільш складна апаратурна реалізація методу контролю за шириною максимумів на змінному рівні, а чутливість цього методу найнижча при порівняно широкому діапазоні вимірів.

Апаратурна реалізація алгоритмів вище наведених методів контролю спрощується при використанні в якості приймачів зображення однокоординатних ПЗЗ.

У цьому випадку всі три методи можуть бути реалізовані із застосуванням єдиної апаратури: ПЗЗ-приймачів, з'єднаних з мікроЕОМ. Програмне забезпечення такого комплексу може бути виконане на основі алгоритмів розглянутих методів контролю.

Для оцінювання експлуатаційно-технічних характеристик методів контролю була виготовлена експериментальне устаткування у вигляді КОС [4.38, 4.44, 4.45] і записані спектрограми квазіперіодичних структур з відомими  $\bar{a}_x$ ,  $\bar{b}_x$ ,  $\sigma_a$  й  $\sigma_b$

За спектрограмами відповідно до алгоритмів методів обчислені параметри  $\alpha_{mn}$ ,  $\beta_{mn}$ ,  $\gamma_{mn}$  і визначений  $\sigma_b$  всіх структур, що дозволило оцінити похибки кожного методу, що відповідно становить 3, 2 і 5 мкм.

#### **§ 4.4. Система автоматизованого вимірювання діаметру і еліптичності тонких дротів**

Контроль якості таких матеріалів, як дріт, після їх механічної обробки є необхідним для створення високоякісної продукції точного приладобудування, оптичного приладобудування, а також радіоелектронної апаратури.

У попередніх розділах було розглянуто деякі схеми контрольно-вимірювальних приладів, що реалізують безконтактний оптичний метод вимірювання діаметру дроту. Даний метод вимірювання діаметра тонкої (товщиною 20-60 мкм) дроту, як і будь-який безконтактний метод, має очевидні переваги перед контактними методами через відсутність механічного впливу (ушкодження поверхні) на вимірюваний предмет і перевірочні засоби.

При цьому для оптичних засобів вимірювання з необхідною точністю й діапазоном вимірюваних параметрів існують прості перевірочні засоби (контрольні об'єкти), які зберігають свої метрологічні характеристики протягом тривалого проміжку часу. Їхнє застосування дозволяє досить просто здійснювати калібровані виміри оптико-електронною апаратурою в автоматизованому режимі.

Використання комп'ютерної техніки під час проведення безконтактного виміру дозволяє здійснювати вимірювання діаметра дроту; а також здійснювати усереднення результатів виміру, вимірювання його відхилень від середнього значення, визначати еліптичність зразка, що зводить до мінімуму ймовірність суб'єктивних помилок оператора та тим самим підвищує якість готової продукції після механічної обробки.

Метод заснований на побудові зображення дроту і його наступному аналізі. Особливістю пропонованого автоматизованого методу є використання комп'ютерної техніки для аналізу побудованого за допомогою оптичної системи зображення (рис. 4.24).

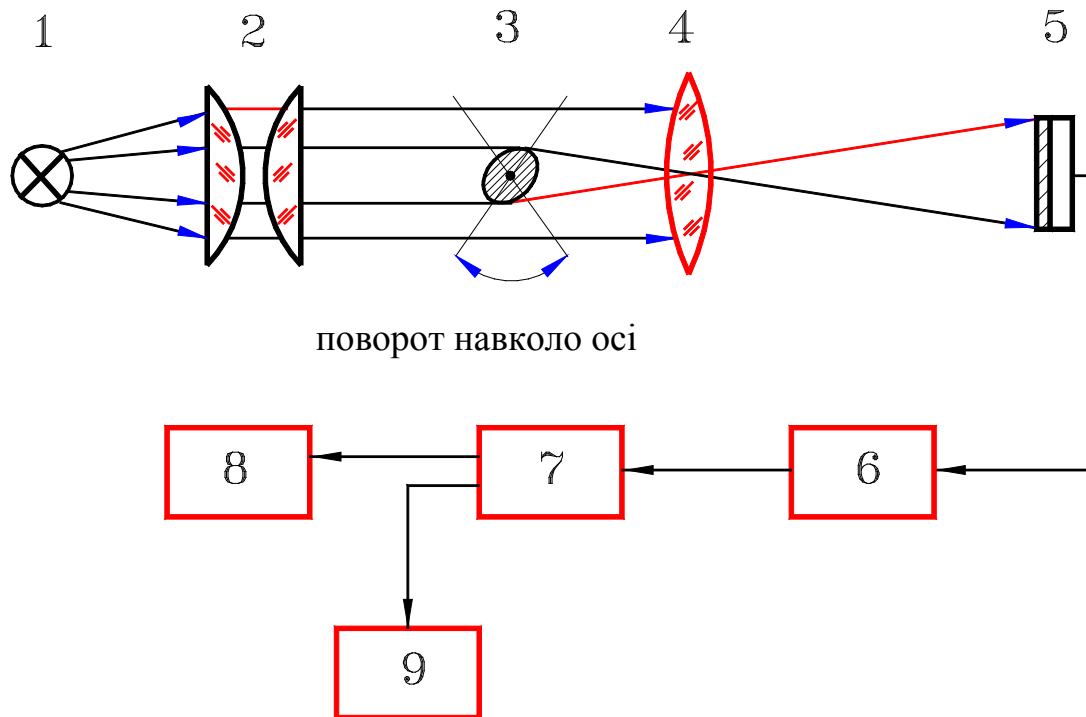


Рис. 4.24. Структурна схема автоматизованого оптичного вимірювального приладу: 1 - джерело світла; 2 - коліматор; 3 - вимірюваний дріт; 4 - об'єктив; 5 - матричний фотоприймач (відеокамера); 6 - контролер відеохоплення; 7 - ЕОМ; 8 - засіб зберігання інформації; 9 - система відображення інформації

Оптичну частину системи становлять джерело світла 1 з коліматором 2 і об'єктивом 4. Крім оптичної системи, призначеної для побудови зображення дроту, до складу приладу включається відеокамера 5 (фотоприймальна матриця) для реєстрації зображення, контролер 6 для перетворення відеосигналу в цифровий вид і процесор 7 для математичного аналізу зображення.

Мінімальна кількість елементів матричного фотоприймача оптико-електронної системи в напрямку поперек дроту повинне визначатися величиною (максимальний діаметр дроту/точність вимірів).

З урахуванням зручності роботи (проведення калібрування, встановлення в апаратуру тощо) число елементів матричного фотоприймача повинне бути понад 200. При формулюванні вимог до числа елементів фотоприймача уздовж дроту необхідно врахувати наступне. На кожному зразку дроту існує багато ділянок, які мають різні параметри шорсткості, що добре проілюстроване, наприклад, на рис. 4.25 – 4.32. Для здійснення фільтрації такого роду параметрів шорсткості, що мають місце на зразку, потрібні усереднені вимірювання на будь-якій ділянці дроту.

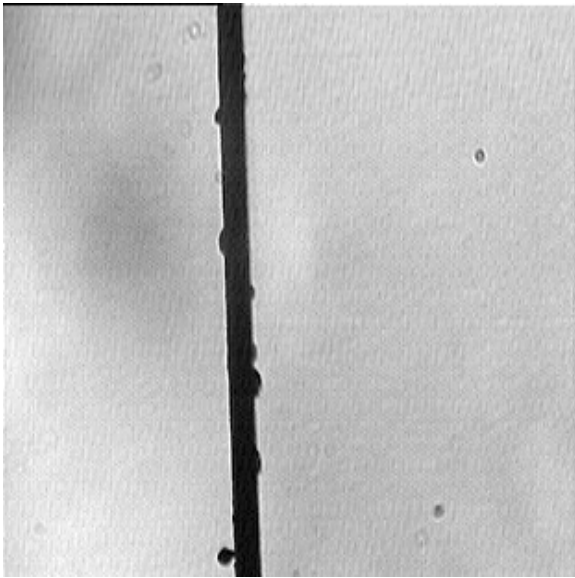


Рис. 4.25. Мікрозображення дроту діаметром 32 мкм зі збільшенням у 8 рази

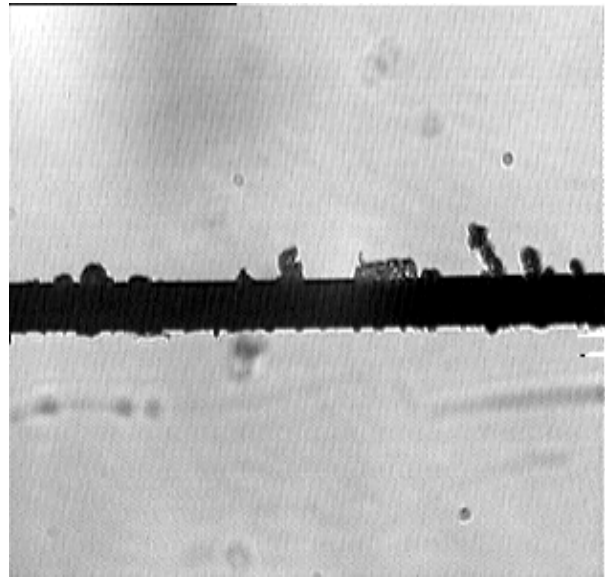


Рис. 4.26. Мікрозображення дроту діаметром 47 мкм зі збільшенням у 8 разів

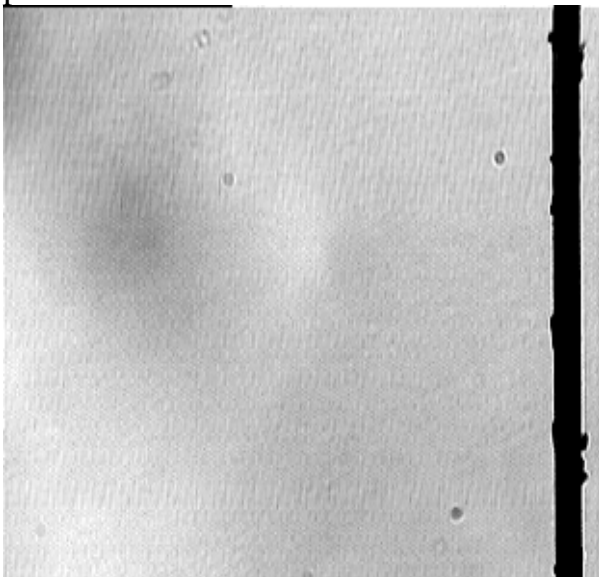


Рис. 4.27. Мікрозображення дроту діаметром 32 мкм зі збільшенням у 8 разів

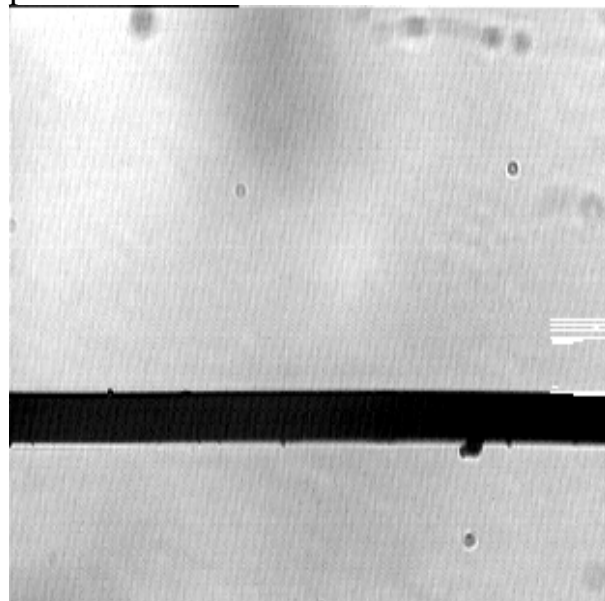


Рис. 4.28. Мікрозображення дроту діаметром 47 мкм зі збільшенням у 8 разів



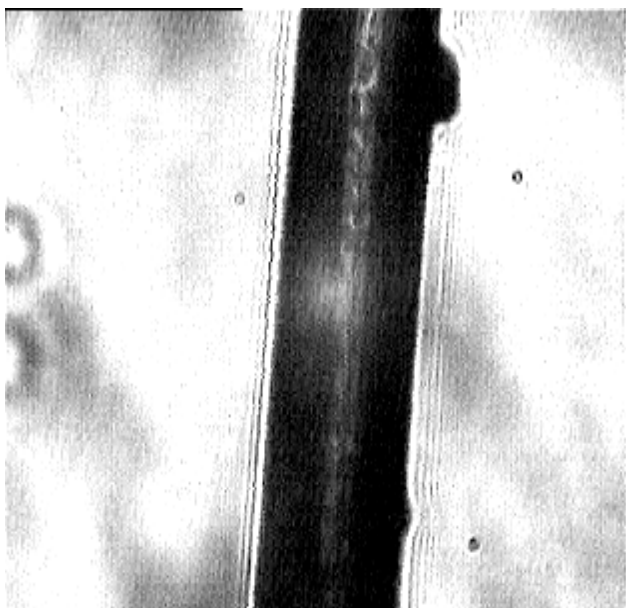


Рис. 4.29. Мікрозображення дроту діаметром 32 мкм зі збільшенням у 40 разів

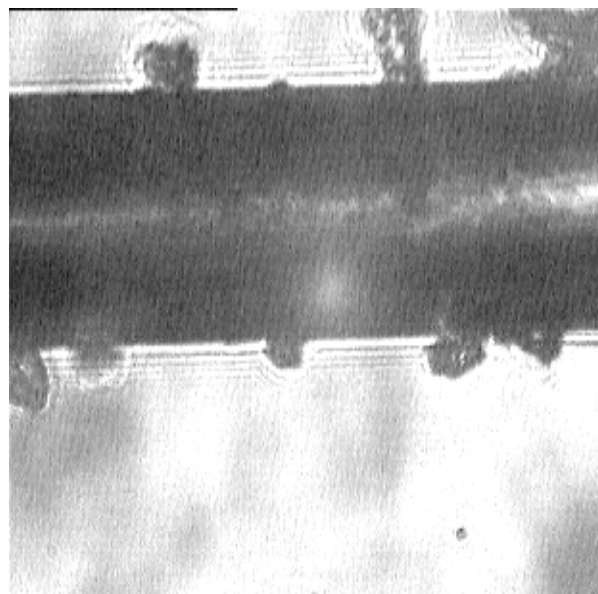


Рис. 4.30. Мікрозображення дроту діаметром 47 мкм зі збільшенням у 40 разів

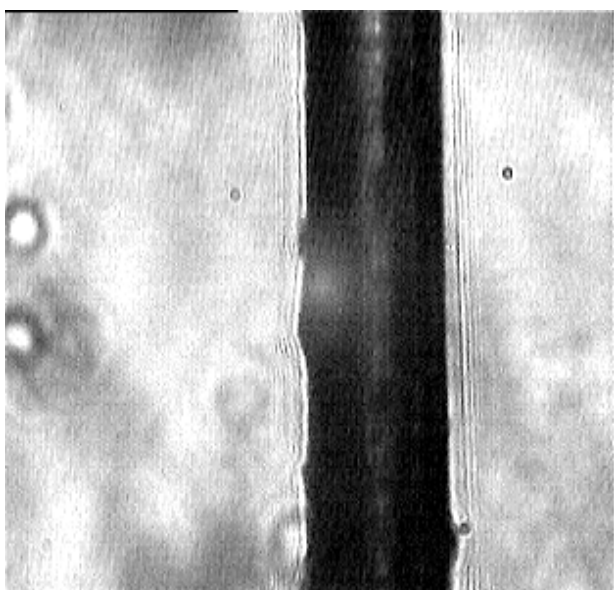


Рис. 4.31. Мікрозображення дроту діаметром 32 мкм зі збільшенням у 40 разів

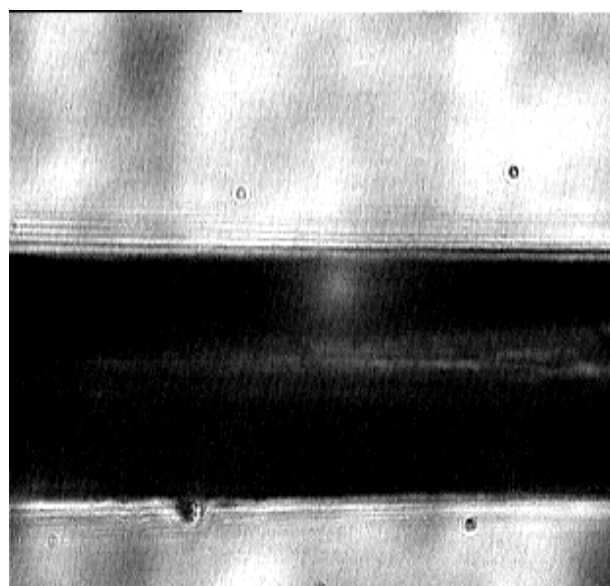


Рис. 4.32. Мікрозображення дроту діаметром 47 мкм зі збільшенням у 40 разів

Переріз вимірюється для кожної крапки уздовж усього зображення. При цьому під час відсутності вигину дроту в поле зору, чим більш витягнуте зображення, тим точніше усереднення. Сформульованим вимогам до фотоприймача задовольняє низка сучасних відеокамер. Побудовані на ПЗЗ структурах, вони мають низький рівень шумів. Як фотоприймач можна також використати фотодіодні матричні приймачі типу ФУК1Л.

Для реєстрації протоколу вимірювань до складу апаратури включені засоби зберігання інформації. Наявність цих засобів дозволяє здійснювати статистичну обробку результатів вимірювань.

Відображення результатів вимірювання можливо за допомогою індикатора, або за допомогою дисплея 9. Крім того, для забезпечення контролю форми перерізу дроту (див. рис. 4.33), до складу контрольно-вимірювальної апаратури входять механічні елементи, що забезпечують поворот вимірювальної головки апаратури щодо осі дроту.

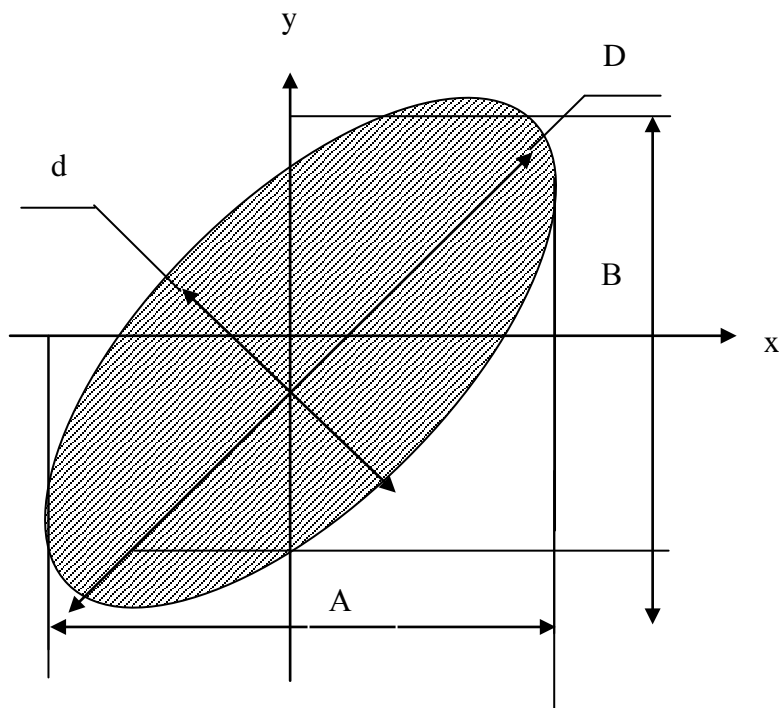


Рис. 4.33. Переріз дроту:  $d$  - розмір малої осі;  $D$  - розмір великої осі;  $A$ ,  $B$  - вимірювані перерізи дроту

У певний момент для забезпечення контролю еліптичності пропонується виконувати вимірювання розміру дроту по двох взаємно перпендикулярних напрямках - горизонталі й вертикалі. При цьому існує ймовірність повороту еліпса дроту, аналогічно наведеному на рис. 4.33. Проте при проведенні вимірів у декількох крапках дроту цей чинник не повинен зробити істотного впливу в силу випадковості зазначеної події. Крім того, в алгоритмі обробки можна передбачити можливість визначення максимального й мінімального значень, забезпечуючи реєстрацію великої та малої осей еліпса.

Апаратура, яку виготовлено відповідно до блок-схеми на рис. 4.24, не вимагає спеціального обслуговування і є придатною для лабораторних досліджень у виробничих умовах.

За допомогою створеної автоматизованої апаратури контролю діаметру дроту, а також параметру еліптичності, побудованої на основі зазначеного

методу вимірів, були проведені вимірювання діаметра дроту зі зразків продукції. Були використані зразки дроту із середніми значеннями діаметра 32 мкм й 47 мкм, отриманими за даними контактних вимірів у лабораторії промислового підприємства. Результати цих досліджень представлені на рис. 4.25 – 4.32.

Для одержання зображень дроту було створено експериментальний зразок автоматизованої вимірювальної системи, містить в себе відповідно до блок-схеми приладу, наведеної на рис. 4.24, мікроскоп, відеокамеру, плату відеоохоплення (відеоконтроллер) і персональний комп'ютер. Зображення зразка устаткування представлене на рис. 4.34.

Система містить мікроскоп МБР-1 (1), що працює у світлі, що проходить, спрямоване двома різними об'єктивами із власним збільшенням у 40 й в 8 разів, відеокамеру AVC591A (2), переходник для кріплення відеокамери до мікроскопа (3), комп'ютер (AMD-ДО6) з убудованою в нього платою відеоохоплення FlyVideo'98EZ (4) і монітор для відображення відеоінформації (5).



Рис. 4.34. Автоматизована вимірювальна система з мікроскопом, що працює у світлі, що проходить

Зібраний макет був використаний для одержання в цифровому вигляді мікрозображень дроту з різним збільшенням, а також мікрозображень спеціальної маски для проведення каліброваних вимірів. Зображення при цьому описувалося цифровим масивом розміром 232\*312.

На рис. 4.25 – 4.28 наведені мікрозображення дроту з діаметром 32 мм та 47 мкм зі збільшенням у 8 разів, на рис. 4.29 – 4.32 - зі збільшенням у 40 разів. На рис. 4.35 та рис. 4.36 наведено мікрозображення маски, які використовувались для калібрування, зі збільшенням у 8 й 40 разів відповідно.

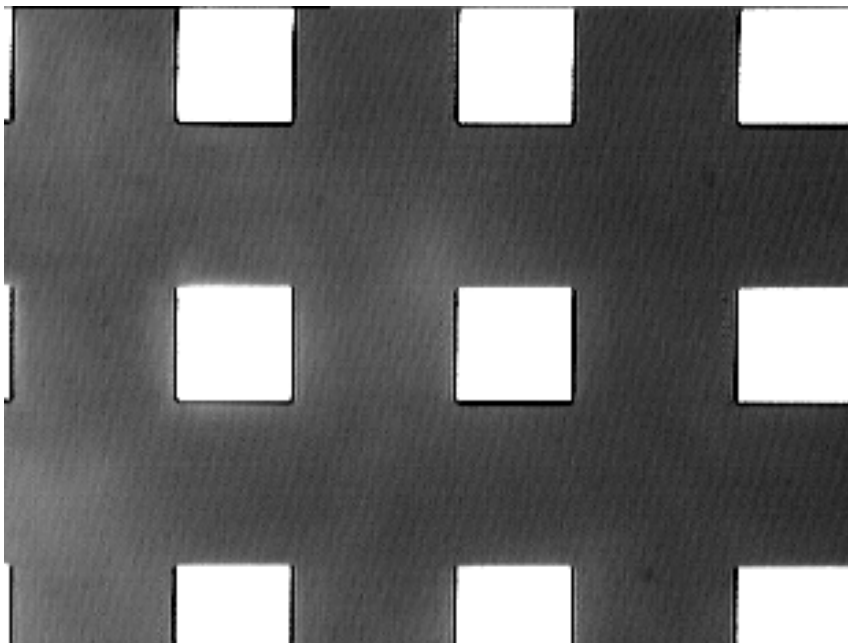


Рис. 4.35. Мікрозображення маски, отримане зі збільшенням в 8 разів

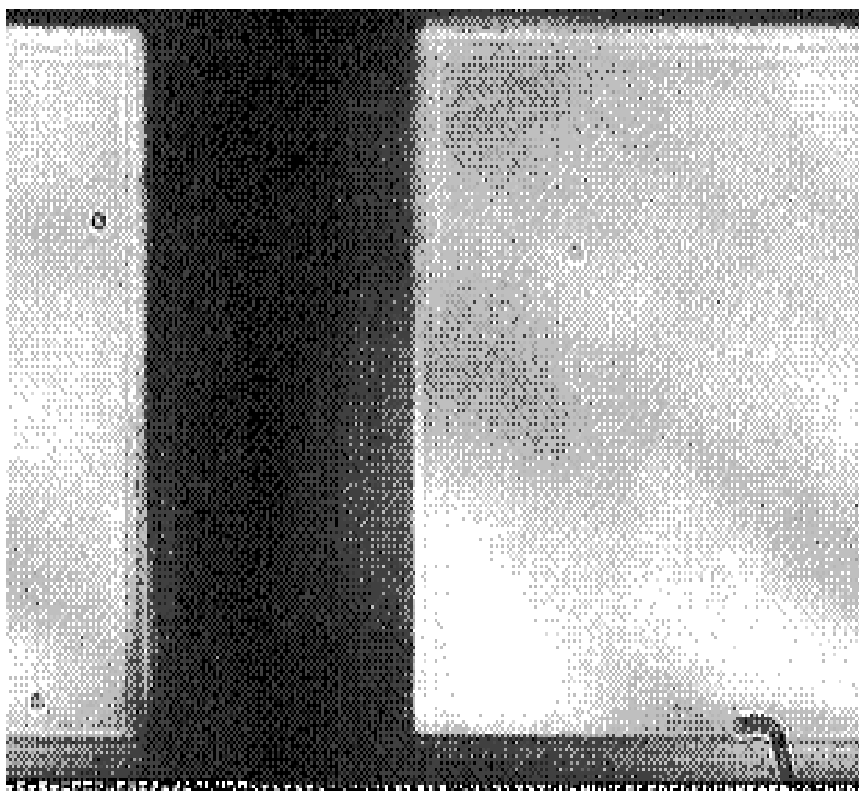


Рис. 4.36. Мікрозображення маски, отримане зі збільшенням в 40 разів

Всі отримані мікрозображення, у тому числі й маски, були оброблені за допомогою спеціально створеного алгоритму з метою виділення границь яскравості на зображеннях і визначення відстані між цими границями в пікселях.

В основі цього алгоритму полягає побудова функції різкості для перерізу зображення уздовж осі, перпендикулярної осі дроту, і визначення координати центра мас цієї функції на границях її максимуму й мінімуму. Цей алгоритм, як показала практика його використання в різних завданнях метрології в промисловості, дозволяє вимірювати координати границі яскравості з помилкою менш 0.2 пікселів, отже, відстань між границями яскравості може бути визначене з помилкою менш 0.5 пікселів.

На рис. 4.37 – 4.46 представлені типові проміжні кроки та результати комп'ютерної обробки мікрозображень дроту. У верхньому правому куті наведене відеозображення дроту до аналізованої площини перерізу дроту, ліворуч верхній графік являє собою величину відеосигналу для цього перерізу, під ним наведений графік обчисленої функції різкості для вищенаведеного відеосигналу. На зазначеному графіку вертикальними лініями позначені отримані в автоматичному режимі координати максимуму й мінімуму функції різкості, отримані внаслідок обчислення координати центра маси цих екстремумів. Ліворуч угорі на рис. 4.37 – 4.46 наведені значення отриманих координат границь яскравості й різниця між ними в пікселях, нижче наведені значення масштабного коефіцієнта, обчислене з каліброваних вимірів, і отримане з його допомогою значення діаметра дроту для даного перерізу в мікрометрах.

Результат вимірів у значній мірі залежить від точності калібрування апаратури. Для одержання масштабного множника з високою точністю була проведена калібрована зйомка спеціальної маски, що являє собою періодичну структуру квадратних отворів, що є виконаною з високою точністю.

Період структури на масці був обмірюваний за допомогою мікроскопа ММУ-3В42, що працює у відбитому світлі, у режимі малого збільшення.

За допомогою мікрометричного гвинта столик зміщався так, що зсув по полю зору склало 31 період маски. Це ж зсув, обчислений за показниками мікрометричного гвинта, склало 7700 мкм.

Помилка виміру повного зсуву не перевищувала 10 мкм.

Таким чином, період ґрат маски (сторона квадрата + відстань до наступного квадрата) становить  $248.4 \pm 0.3$  мкм. Варто підкреслити, що при проведенні перевірочних вимірів була використана маска, що є в наявності. У ході зазначеного вище виміру уточнювалися її параметри.

При реалізації проекту створення апаратури контролю передбачається виготовлення спеціальної маски, параметри якої будуть більше відповідати умовам вимірювань і будуть відомі з високою точністю.

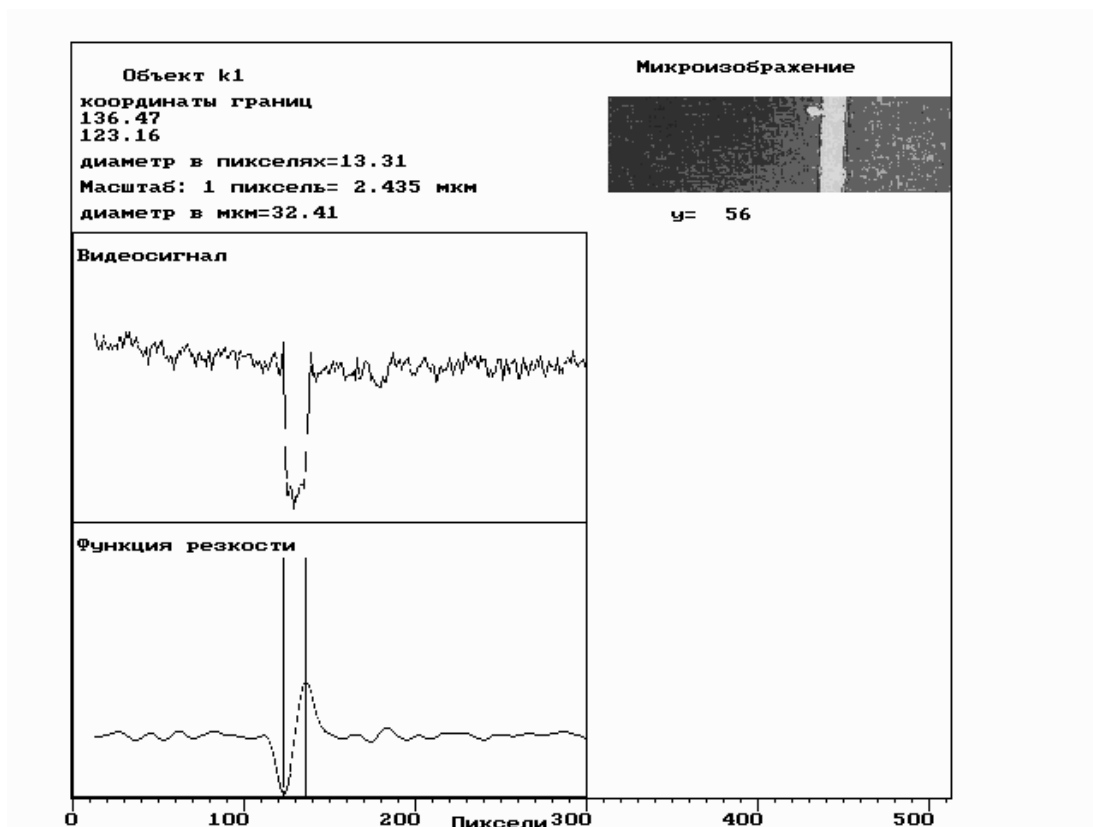


Рис. 4.37. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис.4.25

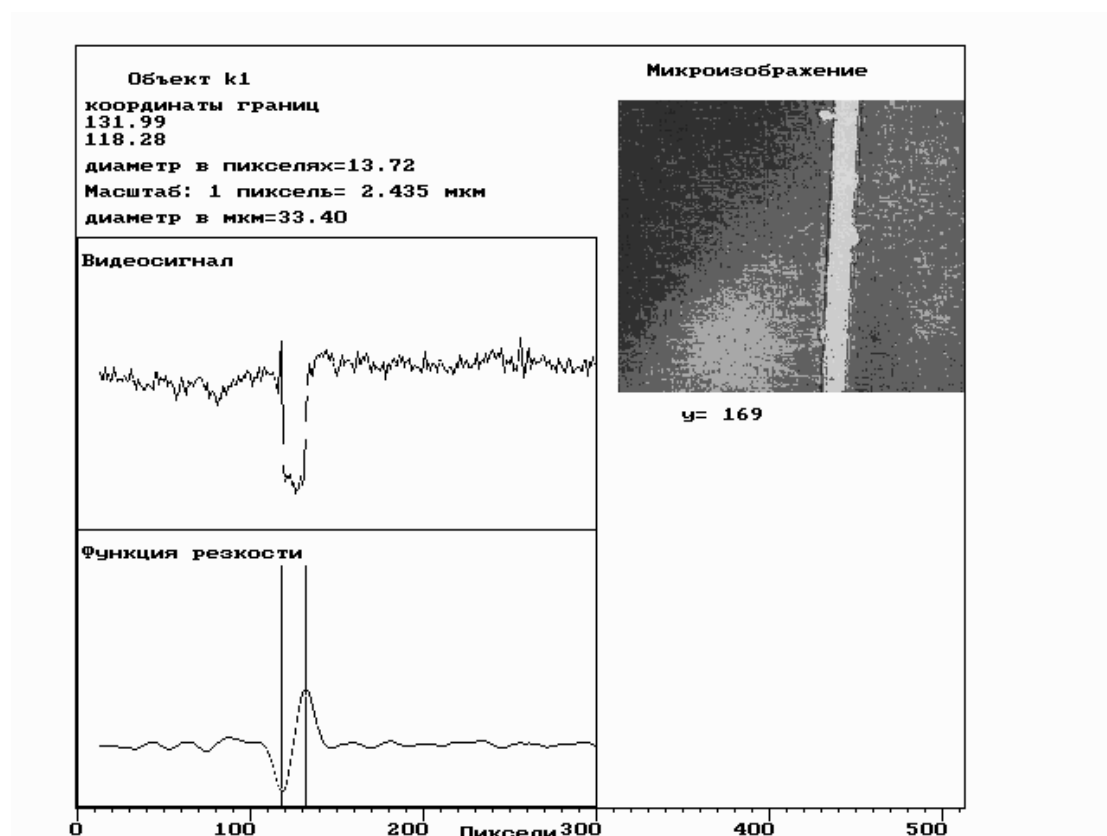


Рис. 4.38. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис.4.25

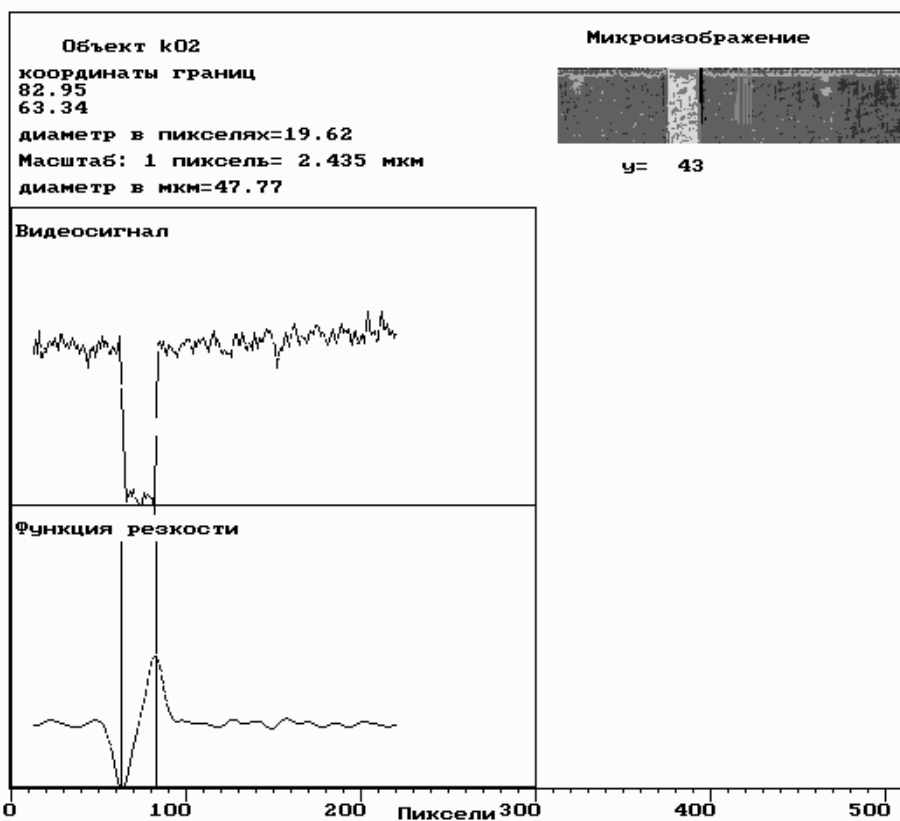


Рис. 4.39. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис.4.26

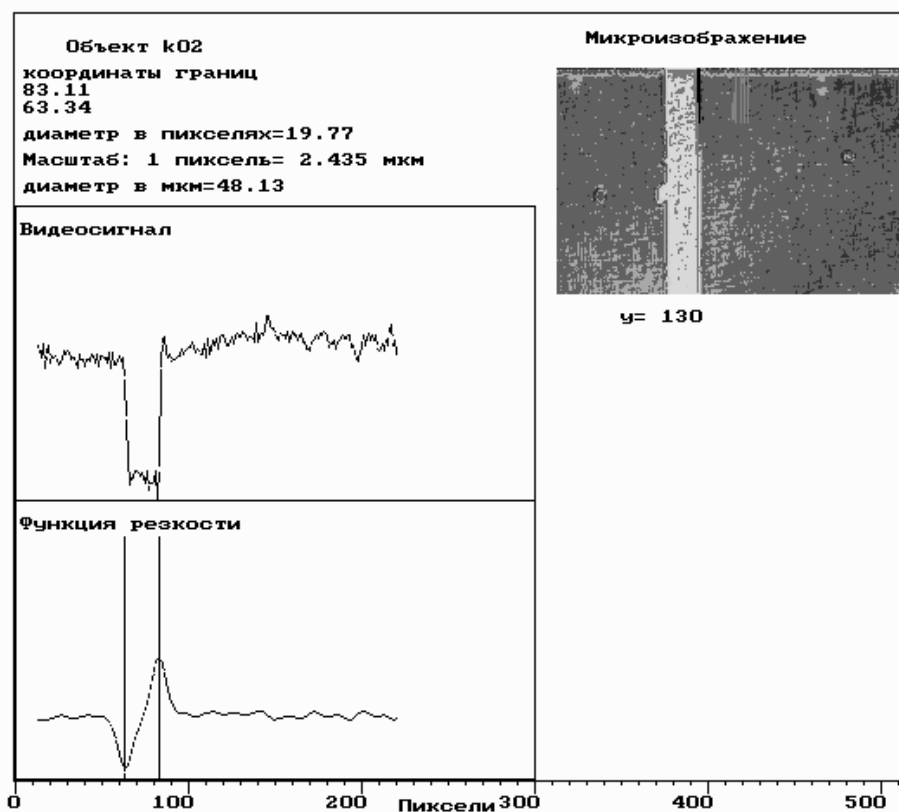


Рис. 4.40. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис.4.26

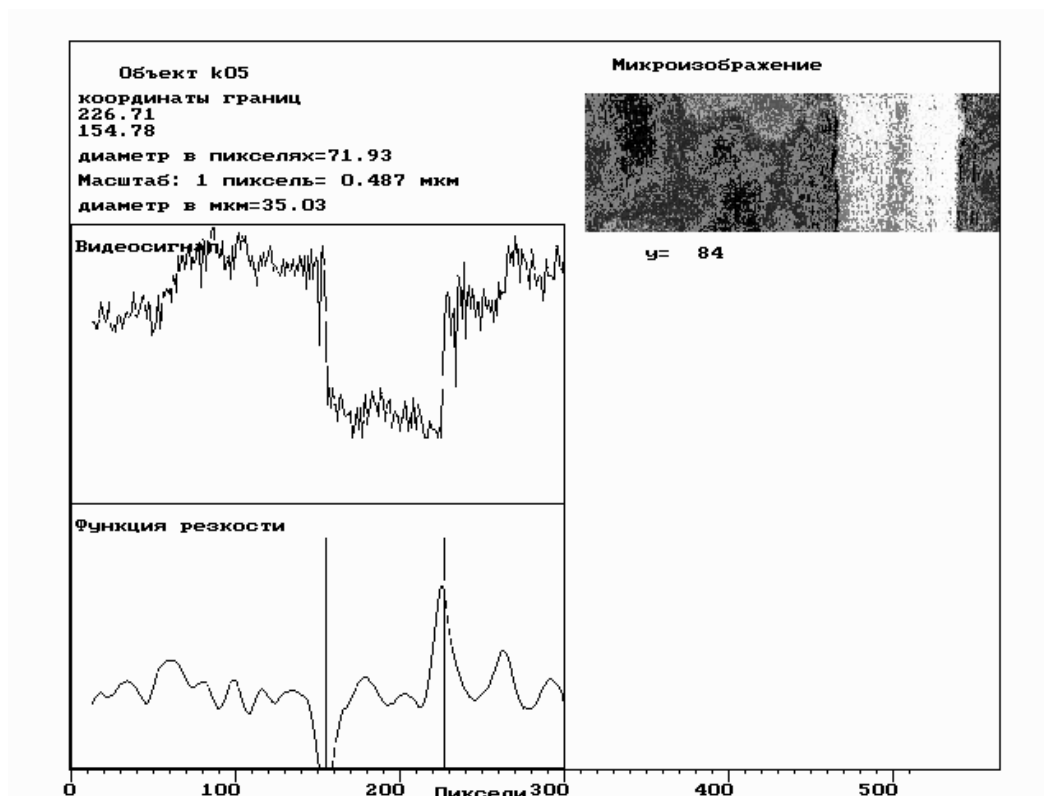


Рис. 4.41. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис. 4.29

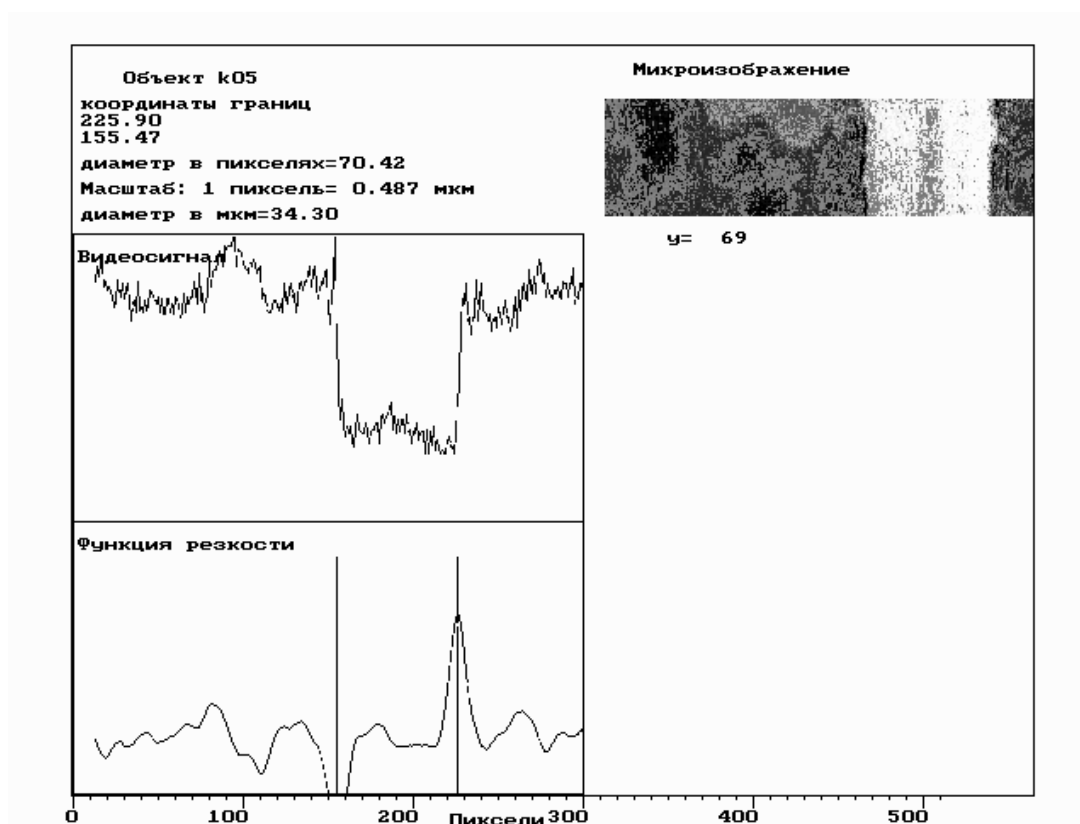


Рис. 4.42. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис. 4.29



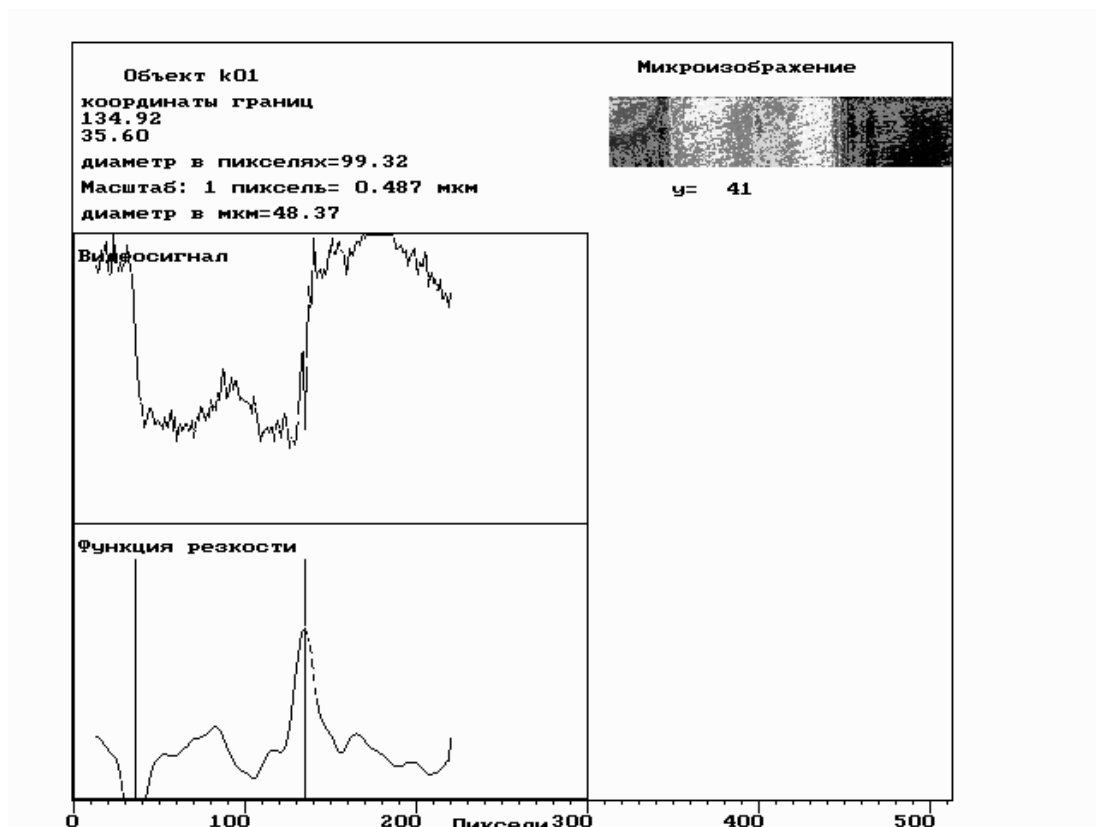


Рис. 4.43. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис. 4.30

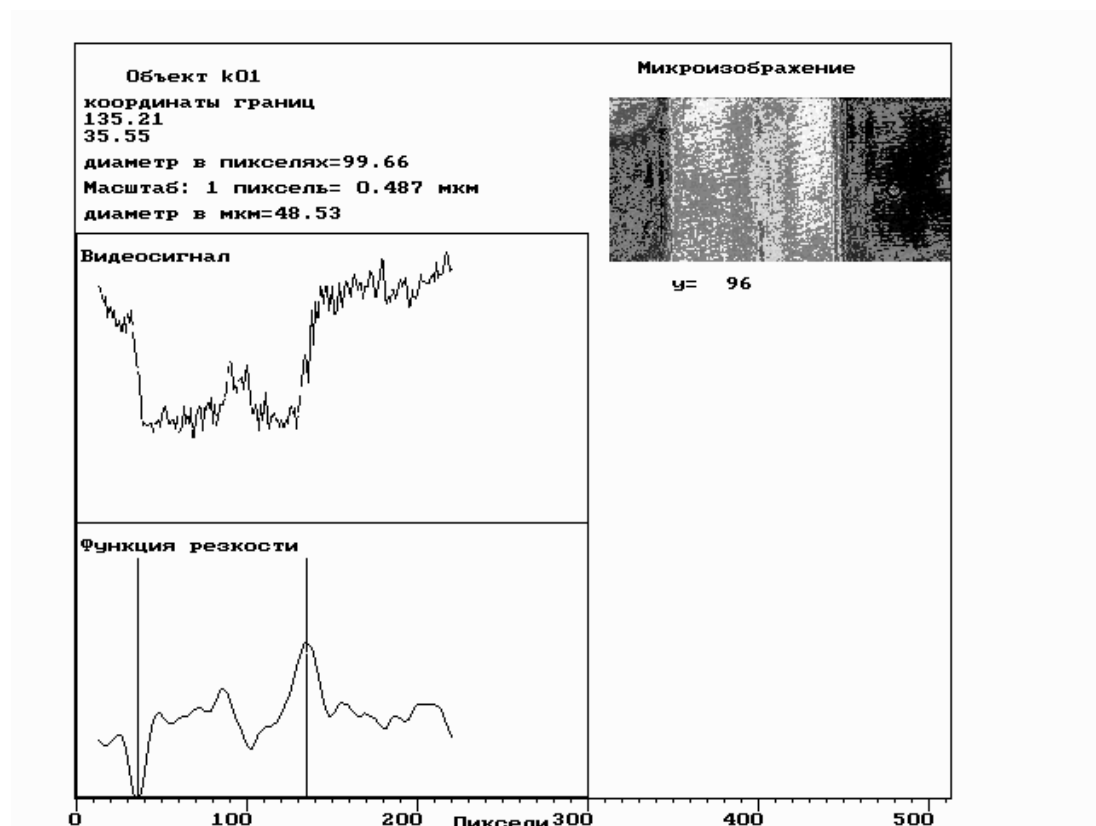


Рис. 4.44. Приклад комп'ютерної обробки мікрозображення рис. 4.30

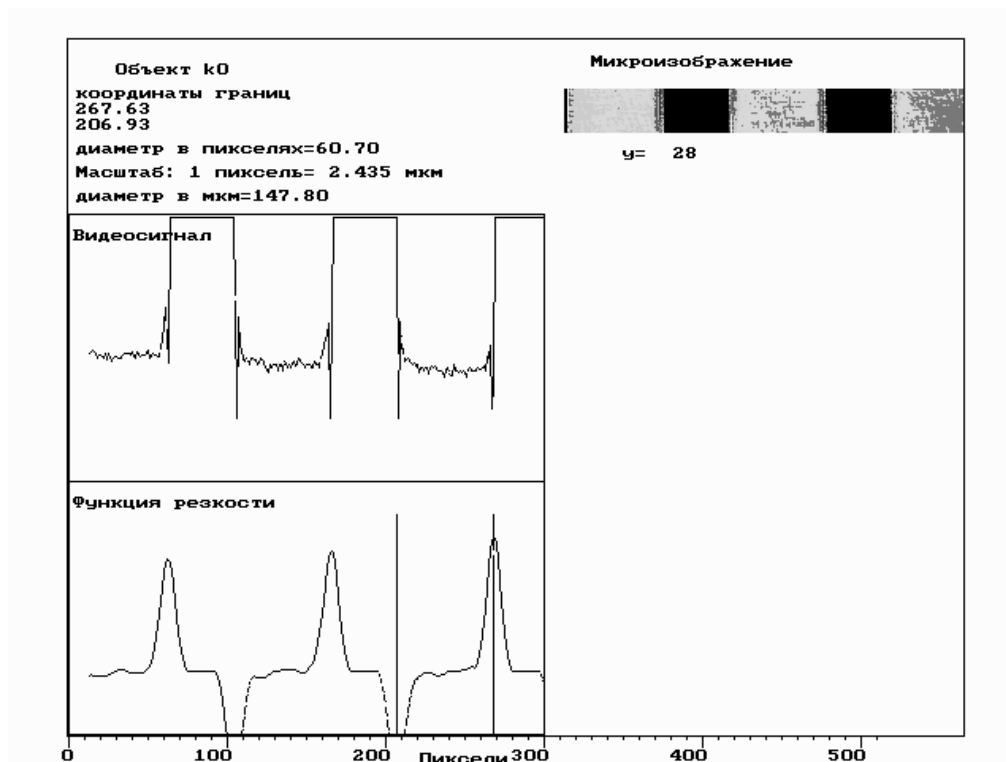


Рис. 4.45. Приклад комп'ютерної обробки маски. Відстань між квадратами 60.70 пікселів

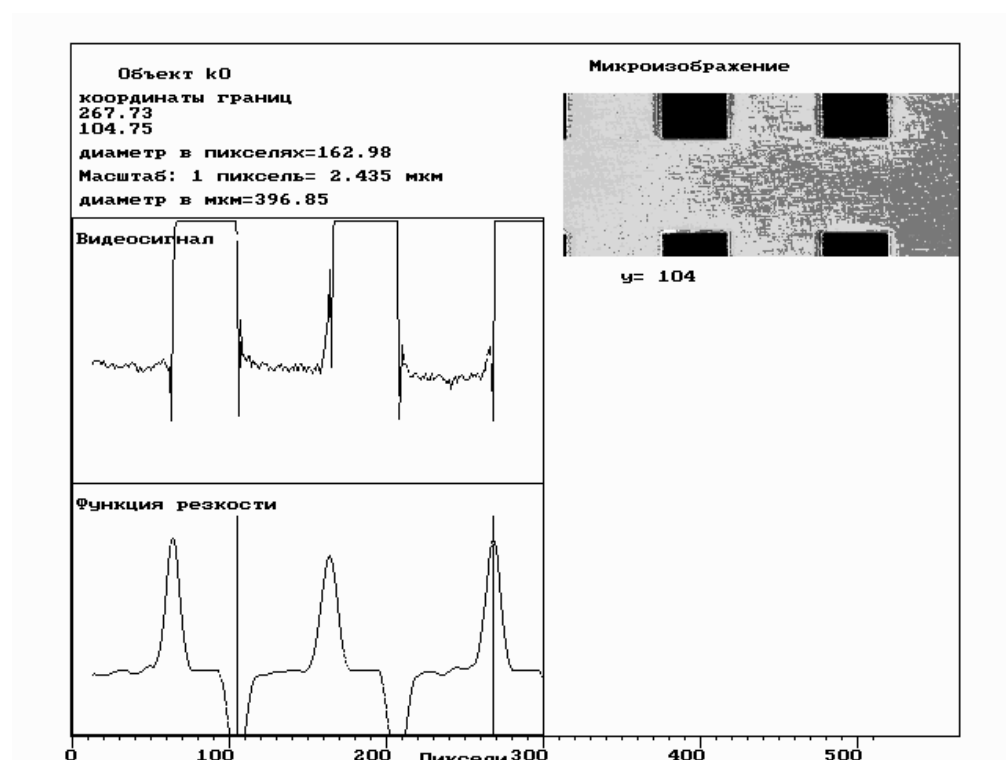


Рис. 4.46. Приклад комп'ютерної обробки маски. Сума періоду маски й відстані між квадратами (рівного 60.70 пікселів з рис. 4.43) становить 162.98 пікселів. Період маски - 102.28 пікселя. Сторона квадрата маски - 41.58 пікселів

На рис. 4.35 зображення маски отримане зі збільшенням у 8 разів.

На рис. 4.45 та рис. 4.46 наведені типові результати комп'ютерної обробки цього зображення. Період маски, визначений за цим зображенням за допомогою вищеописаного алгоритму визначення точних координат границь яскравості, склав у середньому значення, рівне  $102 \pm 0.5$  пікселям.

Отже, 1 піксель у режимі зйомки зі збільшенням в 8 разів відповідає довжині  $2.435 \pm 0.015$  мкм.

На рис. 4.36 зображення маски отримане зі збільшенням в 40 разів. Період маски не міститься в цьому випадку повністю в поле зору. Тому спочатку обчислимо відношення періоду маски до сторони квадрата з рис. 4.35 (у режимі збільшення в 8 разів). На цьому рисунку сторона квадрата становить  $42 \pm 0.5$  пікселя, а загальний період -  $102 \pm 0.5$  пікселя. Сторона квадрата становить  $0.411 \pm 0.003$  частина періоду. Період, як було сказано вище, становить  $248.4 \pm 0.3$  мкм. Сторона квадрата, обчислена згідно рис. 4.35, (у режимі збільшення в 40 разів) становить  $102 \pm 1$  мкм. Як показали обчислення, наведені на рис. 4.36, сторона квадрата становить  $209 \pm 0.5$  пікселів.

Отже, у режимі зйомки зі збільшенням в 40 разів 1 піксель відповідає довжині  $0.487 \pm 0.007$  мкм.

Помітимо, що помилка вимірювань у цьому режимі виявилася так велика через те, що виміру сторони квадрата під час вищеописаних каліброваних вимірів були непрямыми, а з використанням даних, отриманих у режимі восьмикратного збільшення. Більше оптимальний вибір еталона зміг би істотно знизити помилку виміру в режимі збільшення в 40 разів.

На рис. 4.25, 4.27 представлені мікрозображення дроту діаметром 32 мкм, на рис. 4.26, 4.28 - мікрозображення дроту діаметром 47 мкм, отримані зі збільшенням у 8 разів.

Поточні значення діаметра дроту на рис. 4.25, 4.27 склали 12-15 пікселів, на рис. 4.26, 4.28 - 18.5-21 пікселів, масштабний множник у цьому режимі зйомки, як показали калібровані виміри, становив значення  $2.435 \pm 0.015$  мкм за 1 піксель.

Отже, плинні значення діаметра, обмірювані в режимі збільшення в 8 разів, становлять значення для тонкого дроту від 29.2 до 36.5 мкм, для товстого дроту - від 45 до 51.1 мкм відповідно.

Для більше тонкого дроту помилка поточного виміру діаметра з обліком всіх можливих джерел помилки становить значення менше 0.23 мкм, для більше товстого дроту - менше 0.3 мкм.

Таким чином, у режимі восьмикратного збільшення можливо забезпечити поточний вимір діаметра дроту з помилкою менш 1%.

На рис. 4.29, 4.31 представлені мікрозображення дроту діаметром 32 мкм, на рис. 4.30, 4.32 - діаметром 47 мкм, отримані зі збільшенням в 40 разів. Товщина дроту, представленого на рис. 4.29, 4.31, становить 68-74 пікселів, на

рис. 4.30, 4.32 - 98-101 пікселів. Масштабний множник у цьому режимі зйомки становить значення  $0.487 \pm 0.01$  мкм за 1 піксель.

Таким чином, плинні значення діаметра, які обмірювані в режимі збільшення в 40 разів, становлять значення для більше тонкого дроту від 33.1 до 36 мкм, для більше товстого дроту - від 47.7 до 49.2 мкм відповідно.

Помилка поточного виміру діаметра в режимі збільшення в 40 разів з обліком всіх можливих джерел помилки для тонкого дроту становить значення менше 0.5 мкм, для товстого дроту - менше 1 мкм.

Отже, у режимі збільшення в 40 разів поточний вимір діаметра дроту було проведено з помилкою менш 3%.

Проведені виміри в цілому відповідають очікуваним значенням, а вимірювання, які проведені з різним збільшенням, добре корелюють один з одним. Точність виміру в режимі сорокакратного збільшення виявилася нижче, ніж у режимі восьмикратного збільшення, що пов'язане з використанням каліброваних даних, отриманих при використанні об'єктива з восьмикратним збільшенням. Більше точні калібровані виміри можуть істотно знизити помилку вимірювань в режимі сорокакратного збільшення деталі, яку контролюють.

Непрямою характеристикою еліптичності дроту є зареєстрований розкид величини її перерізу для різних вимірів діаметру дроту.

Результати проведення випробувань експериментального зразка автоматизованої вимірювальної системи підтвердили обґрунтованість обраної схеми побудови, створеного алгоритму роботи, можливість одержання заданих технічних характеристик деталей, які контролюють у промислових умовах. Подібні системи можна застосовувати в умовах виробничої лабораторії для вихідного контролю якості виготовленої продукції. Проте для контрольно-вимірювальних операцій у ході технологічного процесу виготовлення подібні системи потребують значної доробки.

#### **§ 4.5. Автоматизована система вимірювання параметрів шорсткості поверхні деталей**

У промисловості для неконтактних вимірювань шорсткості поверхні застосовуються інтерференційні мікроскопи (див. розд. 3). Так, інтерференційний мікроскоп МІІ-4 забезпечується фотографічними пристосуваннями, що дозволяють вимірювати шорсткість методами планіметрії отриманого зображення. Більш досконалою є апаратура, заснована на цьому ж принципі, містить телевізійну камеру з подальшим запам'ятовуванням і аналізом зображення за допомогою міні-ЕОМ.

Недоліком інтерферометричного методу є неможливість контролю форми профілю нерівностей.

Серед методів неконтактного профілометрування поверхні також добре відомі методи світлового і тіньового перетину [4.46 – 4.50], а також метод ножа Фуко [4.51], що відносяться до фотометричних методів вимірювань.

Метод світлового перетину широко використовується в промисловості для вимірювання  $R_z$  і  $R_{\max}$  на поверхнях, оброблених плоским шліфуванням при значеннях параметра  $R_z$  від 0,5 до 50 мкм.

На поверхню деталі, що має деякий рельєф, під кутом  $\alpha$  до нормалі проеціюється зображення вузької освітленої щілини. Це проміжне зображення щілини відбивається різними нерівностями поверхні, тобто її профілю, і спостерігається за допомогою мікроскопа, оптична вісь якого складає деякий кут  $\beta$  з нормаллю до поверхні. Масштаб зображення, що спостерігається через окуляр мікроскопа, визначається збільшенням оптичної системи і кутами  $\alpha$  і  $\beta$ .

На цьому принципі заснована робота приладу світлового перетину ПСП-2. У приладі використаний гвинтовий окулярний мікрометр МОВ-5-15Х з внутрішнім відліком. Прилад забезпечує вимірювання  $R_{\max}$  від 0,5 до 320 мкм з похибкою від 21 до 11 % відповідно.

Зображення світлового перетину щілини тим різше в приладі ПСП-2, чим краще відбиваючі властивості поверхні, що досліджується.

Відсутність автоматизації ускладнює його широке застосування для 100%-ного післяопераційного контролю. Цей же недолік характерний для приладів тіньового перетину і растрових оптичних мікроскопів.

Ніж (пластинка з гострою прямолінійною крайкою) розташовується у місці, де об'єктив відтворює зображення крапки, що світиться, на досліджуваній поверхні (див. рис. 3.38). Ніж виконує функції діафрагми, чутливої до зсуву зображення джерела світла в напрямі, перпендикулярному його «лезу». Якщо зображення зрушується уздовж леза, то змін освітленості фотоприймачів А і В не відбувається. Розміри оптичного зонда можуть досягати долі мікрометра, що істотно менше розмірів діамантового пера щупових приладів. Це призводить до меншої помилки у визначенні форми профілю.

При точному наведенні освітленості фотоприймачів в крапках А і В рівні. Зсув поверхні об'єкту щодо рівня точного наведення призводить до зміни положення площини зображення відносно кромки ножа та викликає відповідний перерозподіл освітленості в крапках А і В. Різниця освітлення дає інформацію про глибину або висоту крапки, що досліджується по відношенню до рівня точного наведення.

Важливими перевагами оптичного профілометра, де використовується ніж Фуко, є високе розділення порядку 0,01 мкм, можливість автоматизації вимірювань і відсутність механічного контакту з поверхнею, що вимірюється. Недолік методу заключається в обмеженому діапазоні кутів нахилу профілю (до  $12^\circ$ ), при яких вдається вимірювання його форми.

В останнє десятиліття широкий розвиток отримує рефлексометричний метод експрес-контролю шорсткості поверхні. Суть методу полягає в наступному (рис. 4.47). Поверхня, що досліджується освітлюється паралельним пучком світла, що створюється за допомогою лазера. Частина світла відбивається від поверхні дзеркально. Інша ж частина розсіюється в навколишній простір за рахунок мікронерівностей опромінюваної поверхні.

Вимірюючи інтенсивність розсіяного випромінювання в певній точці простору або діаметр зони розсіяння у фокальній площині об'єктиву  $O$ , можна отримати інформацію про деяку усереднену в межах площі зондуючого пучка шорсткість поверхні.

Отримання інформації про шорсткість не у відносних одиницях, а в загальноприйнятих величинах  $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$  виявляється можливим лише при заданні аналітичній моделі форми і просторового розподілу нерівностей. На даний час це завдання вирішується лише для моделі Гауса розсіюючої поверхні, характерної для багатьох поверхонь, оброблених абразивними порошками.

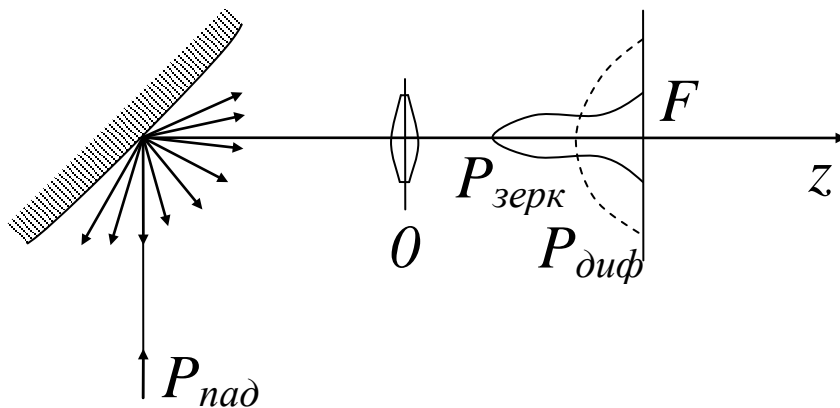


Рис. 4.47. Рефлексометричний метод вимірювання шорсткості

Для даної моделі, якщо середнє квадратичне значення висоти шорсткостей  $\sigma_h$  значно менше довжини хвилі зондуючого випромінювання  $\lambda$ , відношення коефіцієнта віддзеркалення  $R$  у напрямі дзеркального віддзеркалення до коефіцієнта віддзеркалення  $R_0$  абсолютно гладкої поверхні з того ж матеріалу, при нормальному падінні зондуючого пучка, визначається наступним відомим виразом:

$$R/R_0 = \exp\left\{-(4\pi\sigma_h/\lambda)^2\right\} + \left[1 - \exp\left\{-(4\pi\sigma_h/\lambda)^2\right\}\right] \left[1 - \exp\left\{-2(\pi\sigma_h\alpha/\sigma_m\lambda)^2\right\}\right] \quad (4.23)$$

де  $\sigma_m$  - середня квадратична величина нахилу нерівностей;

$\alpha$  - половина кутової апертури приладу, використовуваного для спостереження.

Оскільки значення  $R_0$  для кожного матеріалу при заданій довжині хвилі можуть бути точно відомі, знаходження  $\sigma_h$ , зводиться до вимірювання абсолютного коефіцієнта віддзеркалення. При визначенні  $R$  з точністю  $\pm 0,1\%$  для  $\lambda=0,5$  мкм реальне досяжний дозвіл може досягати  $\sigma_k \leq 0,9$  нм.

Відомо, що статистика Гауса не виконується для ретельно відполірованих поверхонь і поверхонь деталей, оброблених електрофрезом і хімічним

травленням. В цьому випадку когерентна складова, що визначається першим доданком виразу (4.1), істотно відрізняється по амплітуді від сили розсіяного випромінювання, як це показано на рис. 4.47.

Якщо побудувати експериментальну залежність відношення інтенсивності дифузного випромінювання  $I_\alpha$ , що спостерігається під деяким кутом  $\alpha$  до напрямку дзеркального віддзеркалення, та інтенсивності  $I_0$  дзеркально відбитої складової у функції від параметра шорсткості  $Ra$ , то можна побачити, що отримана крива має злам [4.52] (рис. 4.48). Його поява обумовлена різним внеском дифузного і дзеркального компонентів вторинного випромінювання при малих і великих значеннях нерівностей. У роботі [4.52] наголошується, що при відомій (наприклад, атестованою за допомогою щупового профілометра) градуювальній кривій можна істотно розширити робочий діапазон рефлексометричних вимірювачів в область малих значень шорсткості, аж до 0,03 мкм.

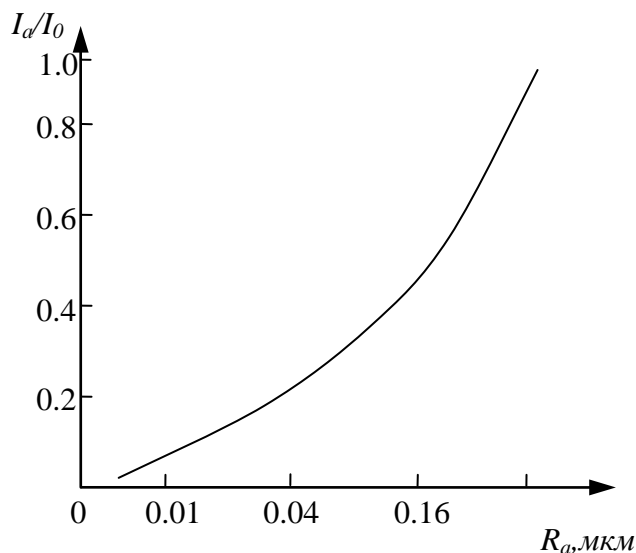


Рис. 4.48. Відношення одного з компонентів дифузної складової вторинного випромінювання  $I_\alpha$  до дзеркальної складової  $I_0$  в функції від параметра шорсткості

Необхідно, проте, мати на увазі, що для різних матеріалів при одному і тому ж способі обробки вид градуювальної кривої змінюється. Це викликано тим, що різні матеріали відрізняються ступенем просторової симетрії нерівностей і щільністю кутів нахилу елементарних площадок, утворених нерівностями поверхні. В результаті змінюється автокореляційна функція, що описує нерівність поверхні, і, отже, індикатриса розсіяння.

Рефлексометричні засоби вимірювання шорсткості вже знайшли широке застосування як засоби експрес-контролю чистоти обробки поверхні в умовах масового виробництва. Застосування знаходять як методи, що використовують лише дифузну складову вторинного випромінювання, так і методи, засновані на

вимірюванні обох компонентів вторинного випромінювання, – дифузного і дзеркального.

Розділення, що досягнуте при використанні рефлексометричного методу вимірювання шорсткості, складає 0,03–0,05 мкм для зони усереднювання від 5 до 20 мкм.

Для реалізації даного методу використовується як видиме, так і інфрачервоне випромінювання. Застосування засобів обчислювальної техніки дозволяє проводити одиничні вимірювання за десяті долі секунди.

Різновидом рефлексометричного методу вимірювань є метод, заснований на дослідженні спекл-структури відбитого від поверхні, що досліджується потоку когерентного випромінювання.

Поява спекл-структури (характерного гранульованого свічення, що спостерігається при освітленні поверхні лазерним пучком) безпосередньо пов'язана з шорсткістю поверхні.

При падінні на поверхню потоку когерентного випромінювання частина його розсіюється на частинках поверхні. При цьому кожна частинка поверхні стає як би точковим джерелом елементарних когерентних хвиль, що мають нескінченне число взаємних інтерференцій на кожній елементарній ділянці оптичного шляху. Спостерігач не в змозі розрізнити окремі фрагменти інтерференційної картини. Він бачить безліч дрібних зерен, що світяться (спекл).

Спекл дозволяє оцінювати якість поверхні шляхом дослідження глибини модуляції в ній або по характеру просторового положення світлих і темних областей. На рис. 4.49 приведена оптична схема приладу, заснованого на дослідженні спекл-структури і призначеного для вимірювання шорсткості поверхні [4.53].

Параметром, що несе інформацію про шорсткість, є глибина модуляції інтенсивності при флуктуаціях спекл-структури під час переміщення поверхні, що атестується, щодо зондуючого пучка.

#### **Технічні характеристики приладу:**

Діапазон вимірювання.....	від 0,32 до 0,05 мкм
Похибка вимірювань . не більше 7%	
Швидкість сканування поверхні .....	40 мм/хв (обмежена можливостями стандартного приводу)
Довжина траси інтеграції .....	0,8 мм
Параметри лазера.....	$\lambda = 0,6328$ мкм; $P = 5$ мВт
Режим.....	одномодовий

Подібні системи достатньо успішно можуть бути автоматизованими, що підвищує якість продукції надточного приладобудування.



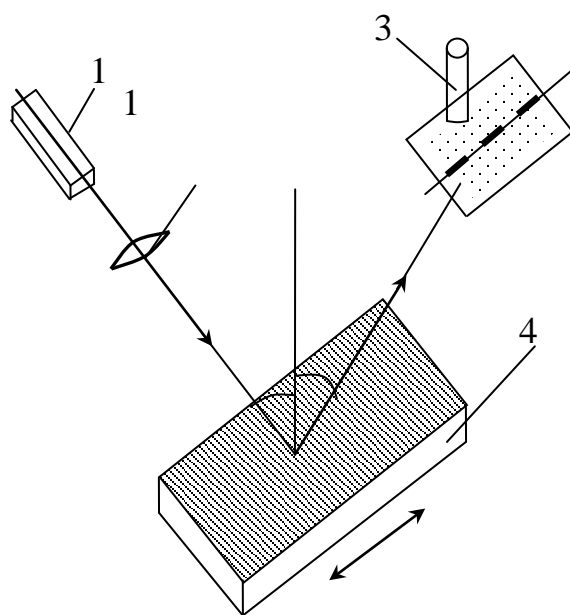


Рис. 4.49. Оптична схема вимірювача шорсткості за спекл-структурою: 1 – лазер; 2 – об'єктив; 3 – фотоприймач; 4 – досліджуваний зразок

Впровадження описаного приладу в практику виробничого контролю якості поверхні деталей типу пластин на етапах фінішної обробки може позитивно вплинути на вихід виробів, придатних для застосування, наприклад в мікроелектронному виробництві.

На кафедрі виробництва приладів НТУУ «КПІ» розроблена і виготовлена експериментальна автоматизована система на базі гоніометра Г1-5Э і комп'ютера IBM PC для дослідження спектрів розсіяного лазерного випромінювання шорсткою поверхнею деталі після механічної обробки. Для контролю та вимірювання параметрів шорсткості поверхні на підставі відомих засад аналізу [4.54] створені авторські аналітичні моделі [4.55], що дозволяють точне визначення якості надточних деталей у приладобудуванні.

Було зроблено оригінальне конструктивне виконання оптичної, механічної та електронної підсистем автоматизованої лазерної системи контролю шорсткості деталі. На рис. 4.50 приведено загальний вигляд конструктивного виконання модулю узгодження ИМС-2 однокоординатного ПЗЗ-приймача з процесором мікро-ЕОМ.

Механічна система вимірювальної автоматизованої системи (рис. 4.51) конструктивно виконана у вигляді станини, на котрій розташовано: штатив з вертикальною кареткою і рухома основа робочого предметного столику зі столиком для юстування та точного настроювання.

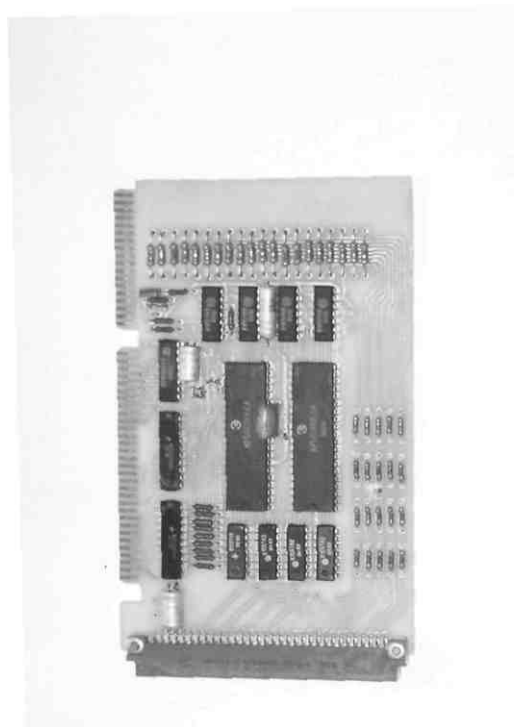


Рис. 4.50. Вигляд модулю узгодження ИМС-2 однокоординатного ПЗЗ-приймача з процесором мікро-ЕОМ

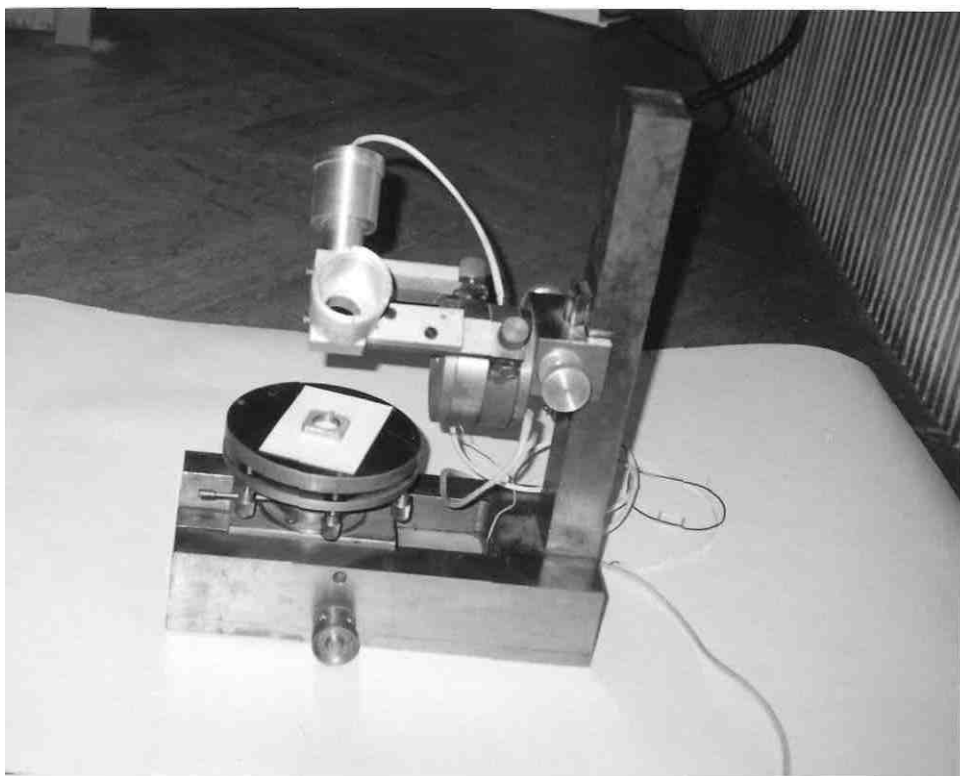


Рис. 4.51. Загальний вигляд автоматизованого вимірювального лазерного модулю контролю шорсткості поверхні деталей

Юстувальний столик має центрувальний отвір, котрий назначається для встановлення спеціалізованих кріпильних пристосувань, які виготовляють під конкретний тип контролюємих деталей. Столик кріпиться до рухомої основи за допомогою опори, яка забезпечує юстування в вертикальній площині, а повертання столику з опорою забезпечується двома радіально-упорними підшипниками. Рухома основа столика зв'язана з станиною через скеровуючу 9 і має можливість механічного переміщення в горизонтальній площині.

Вертикальна каретка призначена для кріплення і юстування в вертикальному напрямку оптичної вимірювальної головки (рис. 4.52). Кріплення оптичної вимірювальної головки до вертикальної каретки проводиться чотирма посадочними гвинтами М6.

Оптична головка містить: джерело когерентного випромінювання - напівпровідниковий лазер ИЛПН-205 з системою стабілізації і живлення; освітлювальну і приймальну оптичні системи; фотоприймальну систему на базі ПЗЗ-приймача (рис. 4.52).



Рис. 4.52. Оптична головка автоматизованої системи вимірювання шорсткості поверхні деталі

Конструктивно освітлювальна і приймальна системи виконані у вигляді двох тубусів, які складаються з оптичних елементів, закріплення котрих виконується різьбовими кільцями.

Освітлювальна та приймальна системи складаються з таких призмних насадок, які забезпечують повертання оптичної осі на кут  $80^\circ$ . Окрім того, забезпечується можливість юстування призми, а також незалежного вертикального переміщення тубусів освітлювальної та приймальної систем.

Інтерфейсний модуль ИМС-2 має в своєму складі чотири канала різноманітної обробки вхідних сигналів котрі програмно перемикаються. Любий сигнал з входу аналогового комутатора можна під керуванням ПКС і РК пропустити через будь-який із вище вказаних каналів і подати на вхід кодувальника з наступним запам'ятовуванням в ОЗП.

Перший канал необхідний для вводу електричного сигналу з ПЗ-приймача, хоч його можна використовувати і для вводу інших сигналів ; має закритий вхід, і утримує вимірювально-перетворювальний тракт з регулюванням підсилення і зсування постійної складової в напрузі сигналу. Полоса пропускання каналу не гірше 1 МГц при нерівномірності частотної характеристики  $\pm 1,5$ Дб.

Другий канал має закритий вхід і призначений для вводу сигналів в діапазоні від - 5,12 до + 5,12В. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) каналу по рівню 0,85 при нерівномірності 2 Дб не гірше 1 МГц.

Третій канал має відкритий вхід і призначений для вводу електричних сигналів в діапазоні від 0 до + 10,24В.

Четвертий канал призначений для вводу сигналів з напругою від - 5,12 до 5,12В. Канал має відкритий вхід.

Сигнал по кожному з чотирьох каналів може бути введений одним із двох способів:

- в режимі автозагрузки СБОЗП (по наружним синхрорежимам джерел сигналу);
- в режимі одноразового запуску кодувальника(що формується програмно (або з пульта) мікро-ЕОМ).

Інтерфейсний модуль узгодження ИМС-2 містить в собі сім службових регістрів, призначених для управління внутрішніми функціями модуля і виконання взаємодій між модулем і центральним процесором мікро-ЕОМ.

Проведені у виробничих умовах експерименти щодо визначення середнього квадратичного відхилення висоти мікронерівностей поверхні деталі після механічної обробки дозволили здійснювати виміри в діапазоні, рівному  $0,069 \div 0,577$  мкм. Подібна система може успішно використовуватись для автоматизованого контролю параметрів якості надточних деталей, що підвищує продуктивність приладобудівного підприємства.

#### **Перелік посилань до розділу 4**

- 4.1. Пресс Ф.П. *Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью.* – М.: Радио и связь, 1980. – 136 с.: ил.
- 4.2. Антошин В.Д., Катановский И.П., Костюков Е.В. Система автоматического контроля геометрических размеров объектов с использованием датчиков изображения на ПЗС // *Электронная промышленность.* – 1981. – Вып. 2. – С. 18-20.
- 4.3. Быстров Ю.А., Колгин Е.А., Котлецов Б.Н. *Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве.* – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
- 4.4. Арутюнов В.А., Есепкина Е.А., Котов Б.А. и др. Выходные устройства систем оптической обработки информации на основе приборов с зарядовой связью В сб. *Оптико-электронные методы обработки изображений.* – Л.: Наука, 1982. – 147-164.
- 4.5. Котлецов Б.Н. *Микроизображения: оптические методы получения и контроля.* – Л.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
- 4.6. Джексон Р.Г. *Новейшие датчики.* – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
- 4.7. Wilson J. and Hawkes J.F.B. *Optoelectrics: An Introduction*, 1983. Xenson Intergration, the Netherlands.
- 4.8. Maluf N. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, 1999/ Artech House/
- 4.9. Fairchild Weston *CCD Sensors 1989 Systems and Development Technology*, Databook Gardner J.W., Varadan V.K. and Awadelkarim O.O, 2001 *Microsensors, MEMS and Smart Devices* (Wiley).
- 4.10. Координатные измерительные машины и их применение / Гапиш В.-А.А., Каспарайтис А.Ю., Модестов М.Б. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 328 с.
- 4.11. Руднева М.С. Алгоритм функціонування координатно-вимірювальної машини на основі сучасних інформаційних технологій // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.* – 2005. – Вип. 30. – С.81-85.
- 4.12. Пупков К.А., Неусытин К.А. Выбор оптимальной структуры измерительного комплекса // *Изв.вузов. Приборостроение.* – 1998. – Т.41, №1-2. – С.34–39.
- 4.13. Борковський О.В. Можливість визначення контурів деталі при обробці зображення з використанням систем робототехнічного зору // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.* – 2009. – Вип. 37. – С.115 – 122.
- 4.14. Идентификация визуальных объектов с использованием знаний / Д.А. Денисов, А.К. Дудкин // *Системы технического зрения.* – М. Наука, 1991. – 200 с.
- 4.15. Ерганжиев Н.А. *Цветное телевидение в измерительной технике.* – М.: Связь, 1980. – 104 с.

- 4.16. Абламейко С.В., Лагуновский Д.М. *Обработка изображений: технология, методы, применение.* – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.
- 4.17. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. *Телевизионные измерительные системы.* – М.: Связь, 1980. – 168 с.
- 4.18. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений* М.: Изд-во Техносфера, 2006.-1701 с.
- 4.19. [http://bankrabort.com/work/work\\_69741.html](http://bankrabort.com/work/work_69741.html)
- 4.20. <http://www.iso-9001.ru/index.php3?mode=&id=906>
- 4.21. <http://www.sedatec.ru/ru/366/368/377/>
- 4.22. <http://www.dsp-soft.ru/?id=41>
- 4.23. <http://www.css-rzd.ru/zdm/02-2004/04001-1>
- 4.24. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
- 4.25. <http://www.mmsonline.com/articles/0306rt3.html>
- 4.26. <http://www.riftek.com>
- 4.27. [www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/03/Vestnik\\_NSU\\_07T2V3\\_p16-20.pdf](http://www.phys.nsu.ru/vestnik/catalogue/2007/03/Vestnik_NSU_07T2V3_p16-20.pdf)
- 4.28. <http://www.threadcheck.com/html/3wire.html>
- 4.29. <http://www.osbornproducts.com/newpages/3wire1-10.html>
- 4.30. [www.iop.org/EJ/article/1742-6596/48/1/105/jpconf6\\_48\\_105.pdf](http://www.iop.org/EJ/article/1742-6596/48/1/105/jpconf6_48_105.pdf)
- 4.31. [www.patentstorm.us/patents/5521707-description.html](http://www.patentstorm.us/patents/5521707-description.html)
- 4.32. [www.bmpcoe.org/bestpractices/internal/ccad/ccad\\_9.html](http://www.bmpcoe.org/bestpractices/internal/ccad/ccad_9.html)
- 4.33. [www.qi2.com/id34.html](http://www.qi2.com/id34.html)
- 4.34. Диагностика процесса металлообработки / Остафьев В.А., В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик. - К.: Техника, 1991. - 152 с.
- 4.35. Акаев А.А., Майоров С.А. *Когерентные оптические вычислительные машины.* – Л.: Машиностроение, 1977.
- 4.36. Зверев В.А., Степанов Н.С. *Экспериментальная радиооптика.* – М.: Наука, 1979.
- 4.37. Митрофанов А.С., Крылов К.И., Прокопенко В.Т. *Применение лазеров в машиностроении и приборостроении.* – Л.: Машиностроение, 1978.
- 4.38. Колобродов В.Г., Тымчик Г.С. // *Оптико-механическая промышленность (ОМП).* – 1980. - № 11. - С.11-13.
- 4.39. Горяинов В.Т., Журавлев А.В., Тихонов В.И. *Статистическая радиотехника.* – М.: Сов. радио, 1980.
- 4.40. Васильев Л.А., Еригов И.В. *Интерферометр с дифракционной решеткой.* - М.: Машиностроение, 1976.
- 4.41. Голант М.Б., Маклакова А.А., Шур М.Б. *Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов.* - М.: Сов. радио, 1969.
- 4.42. Clossen, Danielson, Nielcon – *Rev. Scient. Instr.*, 1958, vol. 29, № 10. p. 855-859.
- 4.43. *RCA uses unique inspection system to eliminate “Bugs” from traveling wave tubes.* – *Petrol and electric. News*, 1967, vol. 35, № 7, p. 26-29.
- 4.44. Колобродов В.Г., Тымчик Г.С. // *ОМП.* – 1982. - № 2. - С. 9-11.

- 4.45. Колобродов В.Г., Тымчик Г.С. // ОМП. – 1982. - № 10. - С. 4.
- 4.46. Кучин А.А., Обрадович К.А. Оптические приборы для измерения шероховатости поверхности. – Л.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
- 4.47. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистой и округлой поверхности. - М: Машиностроение, 1978. – 230 с.
- 4.48. Карташев А.И. Шероховатость поверхности и методы ее измерения. - М. : Изд-во стандартов, 1964. - 163 с
- 4.49. Аксютов Л.Н. Определение параметров шероховатости поверхности оптическим методом // Инженерно-физический журн.. - 1975. - Т.23, Вып. 6. - С. 1079-1083.
- 4.50. Карташев А.И. Исследование микрогеометрии с помощью оттенения молекулярным пучком // ОМП. - 1958. - №7. - С.17-19.
- 4.51. Cros J.F. La Mesure de Rugosite // Mesures, regulation, Automatisme. -1984. – N 2. – P. 7-19.
- 4.52. Двинянинов Б.Л. Влияние материалов изделий на результаты измерения параметра шероховатости рефлексометрическим методом // Заводская лаборатория. – 1984. - № 2. – С. 43-46.
- 4.53. Гребнев А.А. и др. Разработка и применение рефлексометрических датчиков для контроля качества поверхностей деталей приборов / Опыт применения лазеров в приборостроении и машиностроении. – Л.: ЛДНТП. – 1985. – С. 21-26.
- 4.54. С. Солимено, Б. Крозиньяни, П. Ди Порто, Дифракция и волноводное распространение оптического излучения, пер. с англ. -М.: Мир, 1989.
- 4.55. Тимчик Г.С. Методи розв'язання задачі дифракції випромінювання на шорсткій поверхні // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2001. -№ 3.

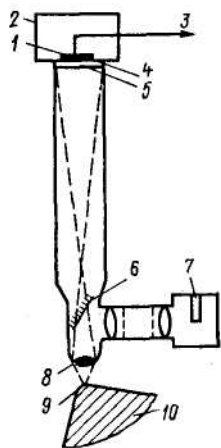
## РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ

Важливого значення в умовах автоматизованого промислового виробництва набувають системи контролю, вимірювання зносу різального інструмента, а також діагностики плинного стану інструмента, стану поверхні при механічній обробці надточних деталей. Ці системи контролю та діагностики повинні бути автоматизованими, оскільки призначені для роботи в складі автоматизованого технологічного обладнання.

### § 5.1. Визначення зносу різального інструмента за допомогою оптико-електронних пристроїв

Разом з посередніми методами контролю якості обробки деталей та діагностики плинного стану різального інструмента, в окремих випадках доцільно використовувати прямі безконтактні методи визначення зносу різальної крайки інструмента, від величини якого залежать параметри шорсткості, формоутворення поверхні надточної деталі.

Зазвичай прямий безконтактний метод вимірювання реалізується за допомогою пристроїв, що містять оптико-електронну систему. Це дозволяє точності та продуктивності у порівнянні з класичним посереднім вимірюванням, оскільки при цьому не вимагається додаткових витрат на створення сигналу від системи технологічного обладнання. Схема оптико-електронного приладу для вимірювань у контролі якості деталей наведена на рис. 5.1 [5.1].



електронний чутник за допомогою джерела світла фокусує світло на щілину, за котрою знаходиться катод фотопідсилювача. Час тривалості сигналу чутника залежить від величини стрічки зносу та швидкості обробки. Час тривалості сигналу відбивається методом кодування часу — коду; по передньому фронту сигналу з чутника генерується імпульс високочастотних імпульсів.

При збільшенні швидкості різання зменшується тривалість одного сигналу, але пропорційно підвищується кількість сигналів, таким чином, що загальне число імпульсів за певний період часу при даній величині стрічки зносу постійне. Слід відмітити, що нормальному функціонуванню чутників схожого типу може заважати стружка, що потрапляє в зону контролю, тому надійним варіантом їх застосування є виконання вимірювань після закінчення (чи в перервах) процесу механообробки.

Відзначимо, що оптичні чутники з використанням світловодів забезпечують підведення променя світла безпосередньо в зону різання від джерела та до приймача відбитого світла. При цьому досягається точність вимірювання  $\pm 0,01$  мм у діапазоні 0,1-0,8 мм.



Відомо декілька методів контролю стану різального інструмента, за властивостями схожими в процесі різання стружки. Наприклад, за її температурою контроль відбувається за допомогою фотодіодів, що працюють в інфрачервоній області.

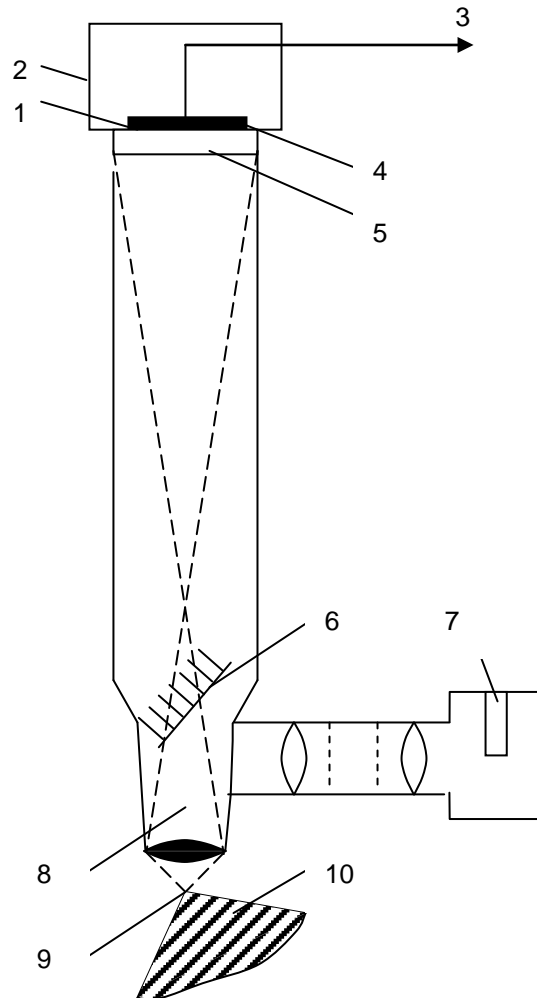


Рис. 5.1. Оптико-електронний чутник зносу різального інструмента: 1 – катод; 2 – фотопідсилювач; 3 – вихід; 4 – щілина; 5 – збільшене зображення стружки зносу; 6 – напівпрозоре дзеркало; 7 – джерело світла; 8 – об'єктив; 9 – стрічка зносу; 10 – різальний інструмент

Пристрої прямого методу визначення зносу дозволяють досягати малих похибок (близько 15 мкм) при вимірюванні розмірів зносу різальної крайки інструмента. Використовуються оптичні системи, засновані на проекційному методі вимірювання, вимірюванні за відбитим пучком від контрольованої поверхні деталі. Так, пристрій [5.2] (рис. 5.2) реєстрації зносу інструмента містить освітлювач зі світловою щілиною, двокоординатний пристрій для переміщення об'єкту, телевізійну камеру, цифровий перетворювач оптичного зображення і дві ПЕОМ із відповідною периферією для обробки цифрової інформації на декількох рівнях.

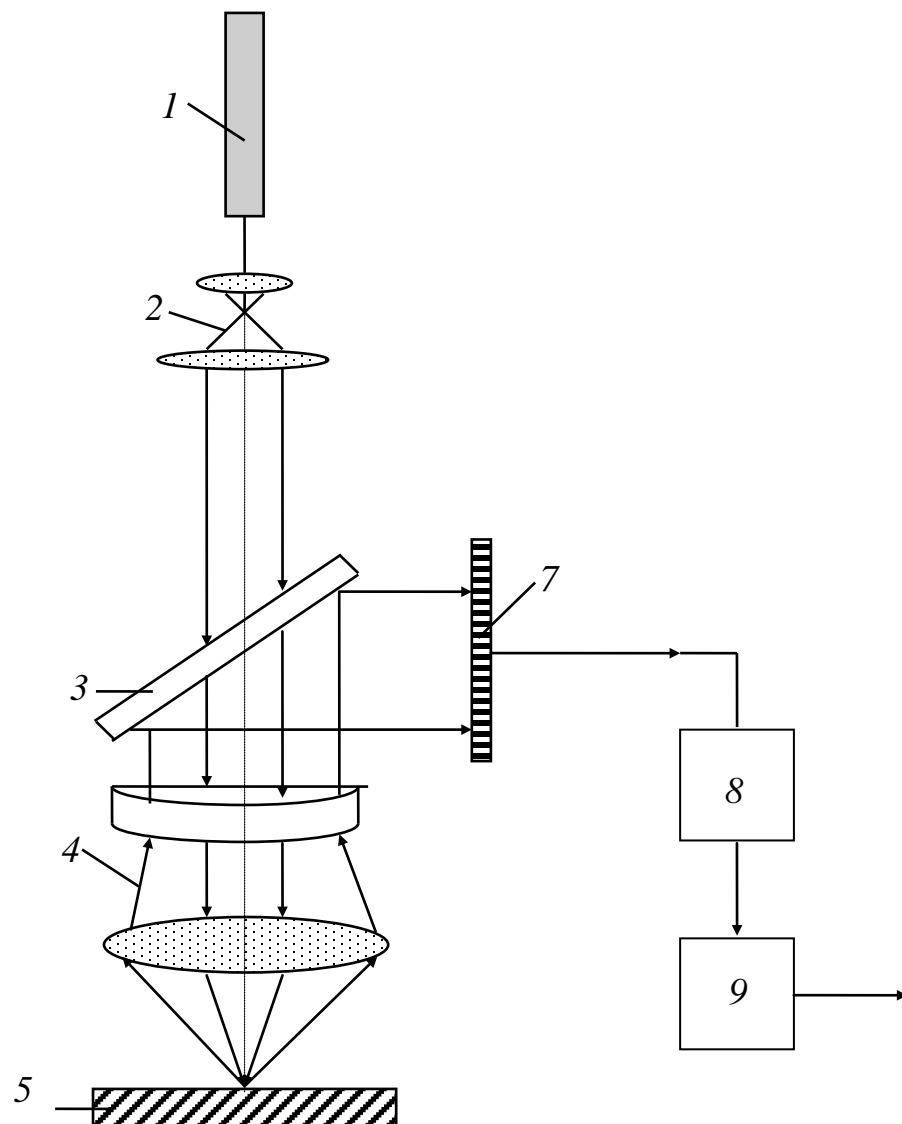


Рис. 5.2. Функціональна схема оптико-електронного пристрою контролю:  
 1 - джерело випромінювання, 2 - коліматор, 3 - світлоподільувач,  
 4 - об'єктив, 5 - контрольований об'єкт, 6 - кут розсіяння світла, 7  
 - матриця фотодіодів, 8 - блок обробки сигналів, 9 - ЕОМ

Здійснюють побудову топографічних перетинів поверхні лунки зносу, зносу по задній грані, будь-якої точки різальної крайки інструмента. Відносна похибка вимірювань при цьому складає не більше 2%, а роздільна здатність оптичної системи - 10 мкм. Проте такий пристрій є дуже економічно неефективним і більш підходить до лабораторних досліджень процесу різання, ніж для промислового використання.

Пристрій [5.3] містить лазер як джерело випромінювання. Відбитий від контрольованої поверхні пучок, який розходить внаслідок хвилястості, що

знаходиться в площині, перпендикулярній напрямку різання, приймають інтегруючим відчутником, фоточутливі елементи якого розташовані у вигляді віяла і встановлені в площині розширення світлового пучка напроти точки освітлюваної поверхні зносу. За зміною вихідних сигналів чутливих елементів визначають величину зносу різальної крайки інструмента.

Оптичний пристрій [5.4] вимірює знос інструмента уздовж різальної крайки по зміні інтенсивності відбитого світлового потоку від досліджуваної поверхні. Відбитий пучок, проходячи через оптичну систему, поступає у вузьку щілину, що формується лезом, і далі у фотоприймач. Залежно від розподілу величини зносу уздовж крайки розподіл відбитого світлового пучка має змінну інтенсивність. Інформативний сигнал надходить в імпульсній формі з виходу лінійного фотоприймача.

Точність вимірювання зносу різального інструмента підвищують при використанні оптоволоконного рефлектометричного чутника, який реєструє зміну світлового потоку, відбитого площинкою стрічки зносу на задній поверхні різального інструмента [5.5]. При цьому аналізують зображення задньої поверхні різальної крайки інструмента, отримане за допомогою телекамери. Використання оптичних методів і засобів контролю стану різального інструмента і якості оброблюваної поверхні деталі можливо також і для процесів обробки осьовим різальним інструментом, що обертається (свердлення, фрезерування, нарізання різьби). Наприклад, методом [5.6] зміна стану різальної крайки інструмента реєструється за зміною ширини амплітуди сигналу фотодіода.

Для вимірювання вібрацій, похибок позиціонування різального інструмента використовують лазерні інтерферометри [5.7, 5.8], які забезпечують похибку вимірювання не більше за 0,6 А. Енергія пружних деформацій, що виникає в матеріалі пари "інструмент-деталь" у процесі різання, створює акустичні коливання. Форма хвилі, напрям її розповсюдження несуть інформацію про джерело деформації матеріалу, про цілісність структури матеріалу. Блок-схема лазерного інтерферометра наведена на рис. 5.3 [5.9].

Позиціонуючі дзеркала разом з шарнірним дзеркалом і телескопічною лінзовою системою, яка може переміщатися по 3 ортогональним осям, дозволяє сканувати зфокусованим пучком лазерного випромінювання по поверхні контролюємого зразка з різною орієнтацією без значних перебудов.

Поляризація світла в опорному і робочому плечах ортогональні, і відповідні складові з цих плечей надходять з другого поляризатора на окремі оптичні детектори. Це дозволяє виявляти сигнал інтенсивності сигнального і опорного пучків. Після модулятора світловий пучок потрапляє на поляризаційний розподільувач пучка, який пропускає пучок з перпендикулярною поляризацією.

Відбитий промінь паралельно поляризований. Ця компоненту проходить через чвертьхвильову пластину, змінюючи поляризацію, і через телескопічну систему потрапляє на поверхню контрольованого зразка. Після віддзеркалення

від його поверхні світло повертається назад за початковим шляхом. При проходженні через чвертьхвильову пластину поляризація відбитою компоненти стає лінійною і перпендикулярною. Аналогічна операція здійснюється і з перпендикулярно поляризованою компонентою, яка відбивається від опорного дзеркала на вібраторі і надходить на оптичний фотодетектор.

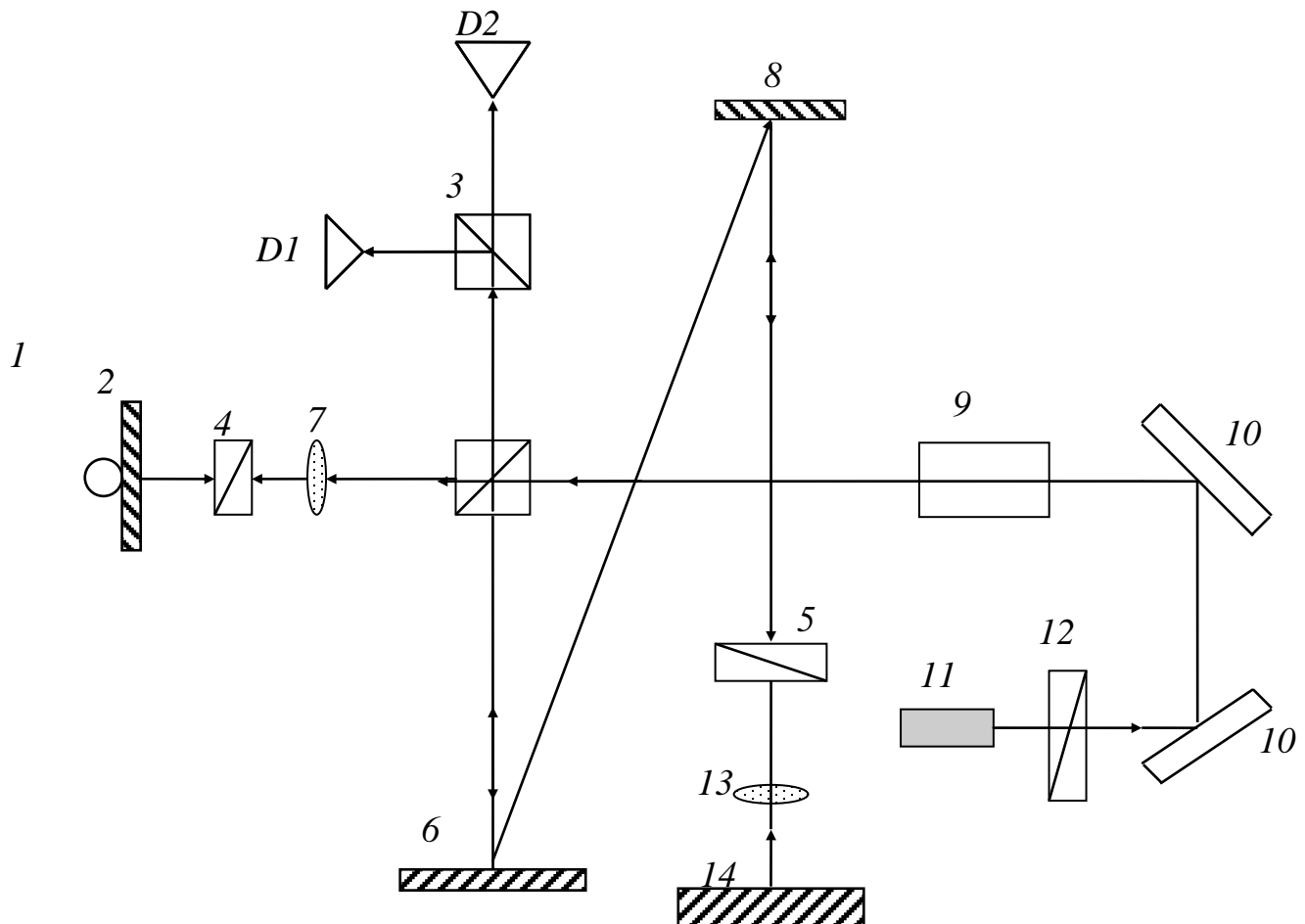


Рис. 5.3. Структурна оптична схема інтерферометричного пристрою контролю акустичних коливань у контролюючому матеріалі: 1 - вібратор на кристалі PZT, 2 - опорне дзеркало, 3 - оптичний детектор, 4 - об'єктив, 5 - чвертьхвильова пластинка, 6 - дзеркало позиціонування пучка, 7 - поляризаційний розподільувач, 8 - шарнірне дзеркало, 9 - електрооптичний модулятор, 10 - дзеркала позиціонування пучка, 11 - лазер, 12 - напівхвильова пластинка, 13 - телескопічна лінзова система, 14 - контрольований зразок

Лазерні зонди мають високу роздільну здатність при аналізі поверхневих акустичних хвиль, що виникають при локальних перебудовах динамічних полів у процесі механообробки матеріалів.

## § 5.2. Визначення стану поверхні надточних деталей на засадах поверхневих акустооптичних взаємодій

Якщо розглянути задачу спостереження за станом поверхневих ефектів в динаміці при зміні параметрів шорсткості деталі та поверхні РІ в зоні обробки, то можна привести її до визначення характеристик оптичного сигналу, відбитого від поверхні деталі, що досліджується.

Фізична модель відбиваючої ґратки, що створюється на поверхні деталі під час механічної обробки, базується на розв'язанні диференціальних рівнянь руху при розповсюдженні хвилі у ґратці [5.10]. Вона враховує також генерацію об'ємних хвиль, котрі створюються в матеріалі заготовки, і накопичення енергії ґратки. Вираз для коефіцієнту відбиття:

$$\Gamma = j\alpha \left( \frac{h}{\lambda_p} \right) \xi \sin 2k_p a, \quad (5.1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт для хвиль Релея матеріалу;

$k_p = 2\pi/\lambda_p$  - хвильове число поверхневих акустичних сигналів;  $2a$  - ширина неоднорідності поверхні.

$$\text{Коефіцієнт} \quad \xi = \frac{1}{2 \cosh kL} \left[ \left( \frac{1 - g^N e^{-N\nu}}{1 - g e^\nu} \right) e^{kL} + \left( \frac{1 - g^N e^{N\nu}}{1 - g e^\nu} \right) e^{-kL} \right], \quad (5.2)$$

де  $L$  - довжина ґратки,

$$\nu = kd, \quad g = \exp(2k_p d).$$

Як видно з рівняння (5.1), фізична модель описує поведінку коефіцієнту відбиття не тільки на непарних гармоніках. На парних  $\sin 2k_p a$  переходить в нуль.

Підвищення адекватності опису процесів відбиття ПАХ і генерації гармонік можливо при використанні узагальненої моделі ґратки [5.11, 5.12].

### § 5.2.1. Визначення взаємодії та стану об'єктів технологічного процесу на великих відстанях

В цьому випадку застосовуємо джерело когерентного випромінювання, наприклад, напівпровідниковий імпульсний лазер, який здійснює сканування поверхні деталі та поверхні РІ в зоні обробки. Застосовуючи метод синтезованої апертури при аналізі динаміки зміни поверхні під час обробки, можна визначити параметри точки поверхні ( $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$ ), а потім інтерполювати результати методом суперпозиції на поверхні в межах визначеної апертури  $D$ .

В точці поверхні, яку досліджують, при взаємодії об'єктів з електромагнітним випромінюванням створюється електричне поле, обумовлене апертурою, її координатами, відстанню між взаємодіючими об'єктами. При цьому можна записати магнітний вектор, як

$$H = \frac{K}{k} \times E, \quad (5.3)$$

де  $K$  – хвильове число,

$$k = 2\pi/\lambda,$$

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання,

$E$  – напруженість електричного поля.

Позаяк усереднене в часі значення вектору Умова-Пойнтинга є:

$$\langle S \rangle = \text{Re}[S] = 1/2 \text{Re}\langle E \times H^* \rangle, \quad (5.4)$$

можна визначити вираз сигналу, який відбивається від поверхні деталі:

$$S(t) = A_1 \exp[j\omega(t - 2r/c)], \quad (5.5)$$

де  $A_1$  – відповідна комплексна стала, яка містить такі фактори, як потужність випромінювання, відбиваюча здатність поверхні, фазовий зсув, закон розповсюдження (зворотно пропорційний четвертому степеню потужності),  $r$  – відстань між досліджуваною поверхнею об'єкта вимірювання (ОВ) та чутливим елементом (ЧЕ) пристрою контролю сигналу (рис. 5.4).

В параксiальному наближенні вираз для відстані  $r$  набуває форми:

$$r \approx r_1 + (x - x_1)^2 / 2r_1, \quad (5.6)$$

де  $r_1$  – наклонна відстань,

$x, x_1$  – плінні координати ЧЕ.

Тоді вираз для сигналу, що відбивається від досліджуваної поверхні, є:

$$S_1(t) = A_1(x_1, r_1) \exp\{j[\omega t - 2kr_1 - k(x - x_1)^2 / r_1]\}. \quad (5.7)$$

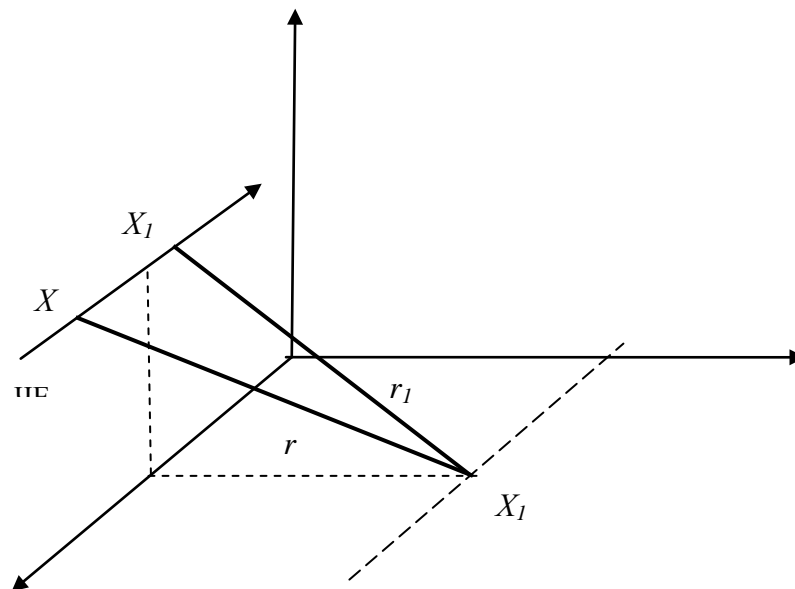


Рис. 5.4. Схема взаємодії технологічного об'єкту дослідження з ЧЕ на великих відстанях, де:  $r$  – відстань між ОВ та ЧЕ,  $r_1$  – похила відстань

Вираз є залежністю від часу та координати, при цьому просторові та часові змінні сигналу залежать між собою згідно  $x = vt$ ,  $v$  – швидкість сканування поверхні.

Якщо використати принцип суперпозиції для  $n$  – точок поверхні, можна визначити повний сигнал, що характеризує поверхневі зміни в динаміці під час обробки деталі, як:

$$S_1(t) = \sum_{n=1}^N S_n(t) = \sum_{n=1}^N A_n(x_n, r_1) \exp\{j[\omega t - 2kr_1 - k(v/t - x_n)^2 / r_1]\}. \quad (5.8)$$

Таким чином визначаємо параметри сигналів, котрі створюються на поверхні при взаємодії ОВ та ЧЕ на великих відстанях, що залежать від режимів обробки, дистанції.

### § 5.2.2. Дифракція світла при відбитті від акустичних ефектів та неоднорідностей поверхні на ближніх відстанях

Якщо розглянути процес відбиття світла від поверхні з поверхневими акустичними хвилями, за принципом Френеля – Гюйгенса, то кожна точка відбиваючій поверхні розглядається як джерело сферичних хвиль, які в подальшому інтерферують. Хвильовому фронту відповідає амплітуда поля, яка визначається енергією світла і коефіцієнтом відбиття в даний точці. Коефіцієнт відбиття залежить від кута падіння і поляризації падаючого світла. Він промодульований і в просторі і в часі за рахунок зміни показника заломлення і скривлення поверхні [5.13-5.16].

Нехай поля в падаючій хвилі і зміщення в поверхневих явищах не залежать від координати  $x_2$ . Початкова фаза хвильового фронту  $\varphi(x_1, t)$  (рис. 5.5) модульована величиною

$$\Delta\varphi(x_1, t) = (\vec{r}, \vec{n}_{\text{від}} - \vec{n}_{\text{пад}}), \quad (5.9)$$

де  $\vec{r}(x_1; 0; u_{30}(x_1, t))$  – радіус-вектор точки на неоднорідності поверхні;

$u_{30}(x_1, t)$  – форма поверхні;

$\vec{n}_{\text{пад}} = (\sin \theta_0; 0; -\cos \theta_0)$  – одиничний вектор падаючого променя;  
 $\vec{n}_{\text{від}} = (\sin(\theta_0 + \theta); 0; \cos(\theta_0 + \theta))$  – одиничний вектор відбитого променя.

Враховуючи вираз для  $\vec{n}_{\text{пад}}$  і  $\vec{n}_{\text{від}}$ , отримуємо

$$\Delta\varphi(x_1, t) = \frac{4\pi}{\lambda_0} \left[ x_1 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta}{2} \right) + u_{30}(x_1, t) \cos \frac{\theta}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta}{2} \right) \right]. \quad (5.10)$$

Тут  $(\theta_0 + \theta)$  – кут відбиття дифрагованої світлової хвилі.

Кутовий розподіл електромагнітного поля відбитої хвилі визначається дифракційним інтегралом

$$\vec{E}_{\vec{a}\vec{u}} = C \exp(-i\omega t) E_0 \vec{p}_{\perp||} \int_{-D/2}^{+D/2} F(x_1) \cdot \hat{R}(x_1, t) e^{i\Delta\varphi(x, t)} dx_1, \quad (5.11)$$

де  $C$  – нормуюча стала;

$F(x_1)$  – розподіл електромагнітного поля по ширині спектру світлового пучка в падаючій хвилі;

$\hat{R}(x_1, t)$  – функція, яка описує процес відбиття на поверхні при заданій поляризації падаючого світла;

$\vec{p}_{\perp, \parallel}$  – одиничний вектор, який описує поляризацію падаючого випромінювання. Для випромінювання, поляризованого в площині падіння,  $\vec{p}_{\parallel} = (\cos \theta_0; 0; \sin \theta_0)$ ; для випромінювання, що поляризоване перпендикулярно площині падіння,  $\vec{p}_{\perp} = (0; 1; 0)$ .

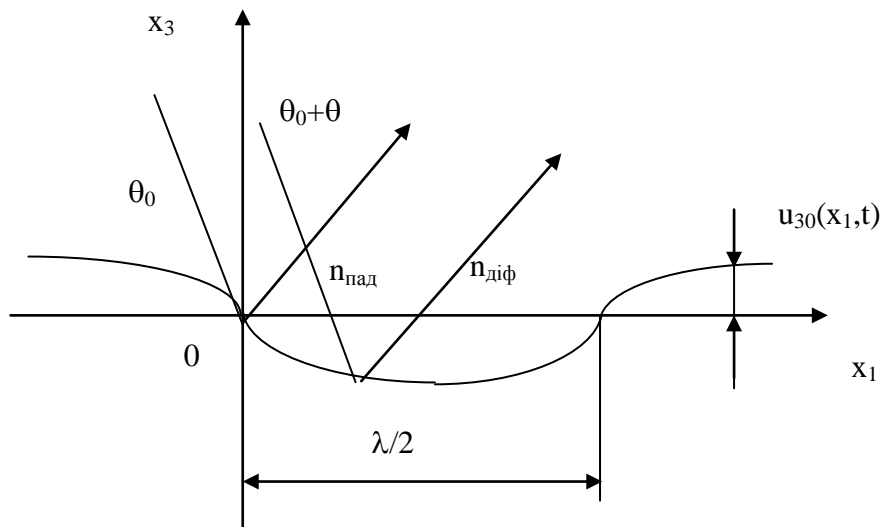


Рис. 5.5. Схема розподілу дифрагованого світла при відбитті від поверхні з поверхневими акустичними ефектами та СМР, де  $\theta$  – кут дифракції

Якщо в тензорі зміни діелектричної проникності на поверхні відсутні недіагональні елементи, то  $\hat{R}(x_1, t)$  – скалярна функція і поляризація відбитої дифрагованої хвилі співпадає з поляризацією недифрагованої хвилі. Наявність недіагональних компонент тензору зміни діелектричної проникності на границі розділу є чинником виникнення дифрагованої хвилі з поляризацією, яка відрізняється від поляризації падаючого світла.

Якщо коефіцієнт відбиття для світла з заданою поляризацією від поверхні  $x_3 = 0$  не залежить ні від часу, ні від координат, інтенсивність дифрагованого світла може бути представлена у вигляді:

$$I(\theta) = \overline{\vec{E}_{\text{eid}}(\theta, t) * \vec{E}_{\text{eid}}^*(\theta, t)} = \mathcal{R} \sum_{m=0}^{\infty} \Psi_m^2 U_m^2, \quad (5.12)$$

Риска означає осереднення по часу;

$\mathcal{R}$  – коефіцієнт відбиття;



$U_m$  – функція, котра залежить від поперечного розподілу амплітуди світла в падаючій хвилі  $F(x_1)$ .

Для гаусовського розподілу  $F(x_1) = E_0 \exp(-\pi p^2 x_1^2)$

$$U_m = U_m^{\Gamma} = \exp \left\{ - \frac{\left[ 2k_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta}{2} \right) + mK \right]^2}{4\pi p^2} \right\}. \quad (5.13)$$

Для однорідного розподілу  $F(x_1) = E_0$  при  $-\frac{D}{2} < x_1 < \frac{D}{2}$ ,  $F(x_1) = 0$  при  $|x_1| > \frac{D}{2}$

$$U_m = U_m^0 = \frac{\sin \frac{D}{2} \left[ 2k_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta}{2} \right) + mK \right]}{\frac{D}{2} \left[ 2k_0 \sin \frac{\theta}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta}{2} \right) + mK \right]}. \quad (5.14)$$

При визначеному виборі параметрів  $p$  (чи  $D$ ) дифракційна картина є набором  $m$  розв'язаних дифракційних порядків. Кут  $\theta_m$ , при якому інтенсивність світла в  $m$ -ому дифракційному порядку максимальна, знаходиться з умови

$$2 \sin \frac{\theta_m}{2} \cos \left( \theta_0 + \frac{\theta_m}{2} \right) = -m \frac{K}{k_0}. \quad (5.15)$$

По кутах дифракції (при відомих  $\theta_0$  і  $k_0$ ) можна розрахувати величину  $K$  і, отже, швидкість акустичних коливань на поверхні об'єкту.

Функція  $\Psi_m^2$  для бігучої акустичної хвилі є відносна інтенсивність світла в  $m$ -ому дифракційному порядку дорівнює

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{J_m^2(2u_{30}k_0 \cos \theta_0)}{J_0^2(2u_{30}k_0 \cos \theta_0)}, \quad (5.16)$$

де  $J_m$  – функція Бесселя  $m$ -го порядку першого роду.

При малих викривленнях поверхні, коли  $2u_{30}k_0 \cos \theta_0 \leq 0.2$ ,  $J_m$  можна записати у вигляді [5.17-5.19]:

$$(-1)^m J_{-m}(x) = J_{+m}(x) = \left( \frac{x}{2} \right)^m / m!, m > 0,$$

тоді

$$\frac{I_m}{I_0} = \mathcal{R} \frac{(u_0 k_0 \cos \theta_0)^{2m}}{(m!)^2}. \quad (5.17)$$

Представляючи  $u_{30}$  через акустичну потужність, отримаємо

$$\frac{I_{\pm}}{I_0} = \mathcal{R} \frac{p^M k_0^2 \cos^2 \theta_0}{M \Omega W}. \quad (5.18)$$

Лінійний зв'язок між відносною інтенсивністю дифрагованого світла і потужністю акустичних хвиль підтверджується експериментально багатьма дослідженнями [145, 146, 147, 149].

Для акустичних хвиль, які рухаються на поверхні у протилежних напрямках, тобто стоячій хвилі:

$$\frac{I_{\pm 1}}{I_0} = \mathcal{R}(u_{30}k_0 \cos \theta_0)^2 + \mathcal{R}\left(\frac{u_{30}}{s}k_0 \cos \theta_0\right)^2 + 2\mathcal{R}\frac{u_{30}^2}{s}k_0^2 \cos^2 \theta_0 \cos 2\Omega t. \quad (5.19)$$

В такий ситуації, яка часто зустрічається на практиці, вимір загальної інтенсивності дифрагованого світла не дає однозначної інформації про зміщення в поверхневих акустичних хвилях.

З дифракційного інтегралу можна визначити й частотний спектр дифрагованого світла. Для цього необхідно підставити в (5.10) залежність викривлення поверхні  $u_{30}(x_1, t)$  від часу. Частота світла, дифрагованого на бігучій хвилі в  $m$ -ому порядку, дорівнює  $\omega = \pm m\Omega$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ).

Усе сказане вище відносилось до розсіяння світла від поверхні, коефіцієнт відбиття якої не змінювався в часі і в просторі. Для рішення задачі з урахуванням реальні зміни коефіцієнта відбиття необхідно в граничних умовах врахувати викривлення границі і зміну діелектричної проникності поблизу неї.

З граничних умов знаходяться амплітуди дифрагованої при відбитті хвилі  $\vec{E}_{\pm m}^{\perp}$  і  $\vec{E}_{\pm m}^{\parallel}$ , які відповідають нормальний і перпендикулярній поляризаціям до площини падіння.

Нехай падаюча світлова хвиля має поляризацію, перпендикулярну до площини падіння. В [5.20] показано, що

$$E_{\pm 1}^{\perp} \sim -i \left( u_{30}k_0 \cos \theta_0 R_{\perp} + \frac{dR_{\perp}}{d\theta_0} u_{30}K + \frac{dR_{\perp}}{d\varepsilon} \Delta\varepsilon_{22} \right);$$

$$E_{\pm 1}^{\parallel} \sim i \frac{dR_{\parallel}}{d\varepsilon} \Delta\varepsilon_{12}. \quad (5.20)$$

Внаслідок дифракції лінійно-поляризованого світла стає еліптично поляризованим. Це обумовлено тільки лише появою недіагональних компонент в тензорі діелектричної проникності.

Розглянемо, якій вклад кожного з членів (5.20) в амплітуду дифрагованій хвилі з поляризацією, яка співпадає з падаючої. Перший член враховує вплив фазової модуляції. Два інших члена описують вклад до дифракції амплітудної модуляції внаслідок викривлення поверхні. Він пропорційний максимальному куту нахилу викривленої поверхні  $u_0k$  і зміни показника переломлення приповерхневого шару. Позаяк звичайно  $k_0 \cos \theta_0 \gg K$ , впливом амплітудної модуляції можна знехтувати в порівнянні з впливом фазової модуляції, тобто поляризація дифрагованій хвилі співпадає з поляризацією падаючої, інтенсивність дифрагованого світла при цьому з достатньою точністю описати виразом (5.17).

Якщо світ поляризований в площині падіння, то при куті падіння, який дорівнює куту Брюстера, дифракція буде виникати тільки внаслідок амплітудної модуляції при зміні показника переломлення приповерхневого шару.

Проте під час технологічного процесу в масі різального інструмента і заготовки виникають ще і об'ємні акустичні ефекти, котрі характеризують плинний стан інструмента, технологічного обладнання, деталі, яку виготовлюють. Тому їх аналіз потребує окремого розгляду.

### **§ 5.3. Основні схеми побудови лазерних систем аналізу динамічних сигналів при механічній обробці матеріалів**

Розширення функціональних можливостей методів і систем контролю якості процесу механообробки не тільки на чистових, але і напівчистових і чорнових операціях як металів, так і неметалічних, композиційних матеріалів, значне підвищення продуктивності, надійності визначення граничних станів різального інструмента може досягатися застосуванням оптико-електронних гібридних систем обробки інформації про динаміку процесу механообробки матеріалу, що поступають у вигляді сигналів, що характеризують віброакустичні та електродинамічні, електромагнітні явища у зоні різання [5.21]. Такі системи можуть бути побудовані на основі акустооптичних систем, що дозволяють здійснювати процес спектрально-кореляційного аналізу сигналів динаміки різання за допомогою системи оптичної обробки інформації. Підвищення надійності та достовірності таких систем контролю досягається завдяки аналізу сигналів, що характеризують фізичні явища різної природи: коливальні явища системи устаткування і електрофізичні процеси генерування електрорушійної сили різання (ЕРС).

Динамічні сигнали, що характеризують плинний стан процесу механообробки, поступають в оптико-електронну систему у вигляді електричних сигналів відчутників, встановлених в системі технологічного обладнання на мінімальній відстані від зони різання.

Введення електричних сигналів в оптичну систему аналізатора спектру здійснюється акустооптичним модулятором (АОМ) світлових полів, що працює в режимі дифракції [5.13], який дозволяє формувати на виході оптичної системи, наприклад спектр Фур'є досліджуваного електричного сигналу. Так, пристрій [5.14] містить оптичну систему, в якій встановлений дифракційний АОМ, на вхід якого через електронну систему реєстрації і перетворення, таку, що складається з фільтрів, підсилювача, надходить досліджуваний сигнал.

Оскільки зміни параметрів амплітудно-фазо-частотного розподілу світлових полів на виході оптичної системи аналізатора спектру відповідатимуть змінам амплітудно-фазо-частотних параметрів вхідного електричного сигналу, то цілком доцільне застосування таких оптико-електронних систем для аналізу динамічних сигналів процесу різання [5.22, 5.23].

Перевагами цих систем в порівнянні з електронними системами є швидкодія при обробці сигналів, отримання спектральних характеристик сигналу шляхом перетворень Фур'є у масштабі реального часу. Це підвищує продуктивність процесу контролю якості, тим самим знижуючи собівартість системи діагностики та контролю якості виготовлення прецизійних деталей приладів.

В умовах розробки гнучких виробничих систем, інтенсифікації технологічних процесів виникає необхідність групового керування металорізальним обладнанням. Рішення задачі керування групою металообробних верстатів важко здійснити за допомогою багатоканальних електронних систем керування. Такі системи обробки сигналів складні при виробництві, мають низьку швидкодію та велику вартість, не забезпечуючи підвищення продуктивності при здійсненні процесу спектрального аналізу сигналів. Використання інтелектуальних багатоканальних АО пристроїв, які містять багатоканальний АОМ, матричні фотоприймачі на базі ПЗЗ, забезпечує паралельну обробку сигналів динаміки процесу різання, що надходять через окремі електронні канали реєстрації від кожного верстата та дозволяє кардинально вирішити проблему підвищення швидкодії, продуктивності контролю якості, пропускну здатності системи обробки інформації в умовах автоматизованого виробництва. Подібні системи мають високу швидкодію перетворення електричних сигналів в оптичній системі, широку смугу пропускання, адаптивність до типу відчутника, що формує інформативний сигнал.

З метою підвищення точності праці систем контролю та діагностики стану процесу різання при розробці математичної моделі граничного стану процесу різання доцільно враховувати статистичні характеристики сигналу, котрі відображають ступінь зносу різального інструмента (PI). При цьому встановлено, що знос PI найбільш впливає на розподіл густини ймовірності амплітуд первинного сигналу, котрий формується відповідними відчутниками. Аналіз взаємного енергетичного спектра сигналів ВАЕ та ЕРС різання відображає картину динамічних процесів, що відбуваються в зоні різання, підвищує вірогідність команд керування на зміну режиму різання та корекцій процесу обробки, або на прийняття екстремальних рішень у випадку визначених аварійних ситуацій. Це дозволить збільшити функціональні можливості систем контролю якості обробки надточних деталей з використанням різних типів інструментальних, оброблювальних матеріалів та технологічного обладнання.

Обчислення кореляційних залежностей сигналів із застосуванням реєструючих оптичних середовищ дозволяє абстрагуватися від конкретних умов обробки, пов'язаних з режимами різання, геометрією інструмента і заготовки, фізико-хімічних параметрів матеріалів пари "інструмент-деталь", властивостей металообробного обладнання.

Як наголошувалося вище, одночасний аналіз сигналів, що відображають плинну якість обробки, наприклад, ВАЕ, ЕРС різання, дозволяє підвищити достовірність визначення граничного стану інструмента і, як наслідок, якість оброблюваної деталі. Тому доцільно аналізувати взаємні спектрально-кореляційні характеристики сигналів. При цьому у вихідній площині оптичної системи пристрою формується взаємний енергетичний спектр сигналів ВАЕ і ЕРС різання, що відображають картину динамічних процесів, що відбуваються в зоні різання. Це підвищує достовірність формування команд керування на зміну в режимів різання, внесення корекції в процес обробки, або на останов металообробного обладнання у разі виявлених аварійних (передаварійних) ситуацій, обчислювальним пристроєм процесора, підключеним до виконавчих органів верстата з ЧПК. Це дозволить розширити функціональні можливості систем контролю якості обробки прецизійних деталей з використанням різних видів інструментальних, оброблюваних матеріалів, типів металообробних верстатів.

Оптичні системи оптико-електронних пристроїв моніторингу ТП лезвійної механообробки є системами аналізаторів спектрально-кореляційних характеристик просторових сигналів складного спектрального складу. Тому доцільно розглядати основні схеми побудови АО систем, котрі забезпечують точність та надійність обробки зображень.

Отже, на підставі вищевикладеного, можна визначити, що для побудови систем контролю якості процесу механообробки перспективними є акустооптичні гібридні системи з цифровим процесором, що дозволяють здійснити багатопараметричну обробку сигналів динаміки процесу різання, здійснювати групове керування верстатами з CNC, що набуває превалюючого значення в умовах автоматизованого виробництва надточних деталей.

Системи оптичної обробки інформації, побудовані на засадах акустооптичної (АО) взаємодії дозволяють здійснювати перетворення електричних сигналів у їхній оптичний аналог, визначаючи параметри досліджуваних сигналів на основі спектрально-кореляційного аналізу [5.24, 5.25]. Ці системи є оптичними спеціалізованими обчислювачами в гібридних оптико-електронних процесорах для здійснення аналогових операцій помноження, формування спектрів, обчислення кореляційних характеристик.

Математичний апарат, що дозволяє найбільш вірогідно описати перетворення в оптичній системі аналізатора спектрів і звести складні математичні вирази до інженерних формул з урахуванням параметрів реальної оптичної системи, являє собою апарат перетворень Фур'є. АО системи мають високу швидкодію перетворення та обробки електричних сигналів в оптичній системі, широку смугу пропускання, адаптивністю до типу сигналу, що вводиться. Операції перетворення та аналізу спектральних складових здійснюється в режимі реального часу і тому найбільш часто застосовуються для систем контролю динамічних процесів.

Розглянемо математичні співвідношення, що визначають засади роботи акустооптичного аналізатора спектру (АОСА) динамічних сигналів, які характеризують плинний стан у системі технологічного обладнання в наближенні стаціонарності випадкових процесів. Це обумовлено тим, що на тлі досить повільно поточного технологічного процесу різання здійснюється реєстрація окремих реалізацій електричного нестаціонарного випадкового сигналу. Часове вікно реєстрації обумовлене часом АТ перетворення, тобто можливістю реалізувати алгоритм миттєвого спектра Фур'є, що необхідно при визначенні параметрів високочастотних сигналів ВАЕ. Тому всі математичні перетворення будемо аналізувати з погляду стаціонарності процесу.

### § 5.3.1. Аналітична модель операційних перетворень

Пристроєм уведення аналізованих електричних сигналів є дифракційний АОМ 3, що працює в режимі дифракції Рамана-Ната, установлений безпосередньо після формувача 2 когерентні світлові пучки випромінювання лазера 1. За АОМ 3 розташований Фур'є-об'єктив 4, а оптична система пристрою виконана за класичною схемою когерентного аналізатора «транспарант — перед Фур'є-об'єктивом». АОМ виконаний на бігучих ультразвукових хвилях, для звукопровідності якого обраний ізотропний матеріал з високим показником акустооптичної якості.

Оскільки оптична система АТ аналізатора спектрів (АОСА) (рис. 5.6) є в загальному випадку лінійним пристроєм, то основна математична модель роботи реалізації алгоритму перетворення Фур'є, наприклад усіченого, описується інтегралом суперпозиції [5.24] у частотній площині:

$$S_2(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\omega) \cdot G(\omega, \omega') d\omega', \quad (5.21)$$

де  $S_1(\omega), S_2(\omega)$ , - комплексні спектри Фур'є в площинах входу і зображень відповідно,

$G(\omega, \omega')$  - комплексна апаратна функція системи АОСА.

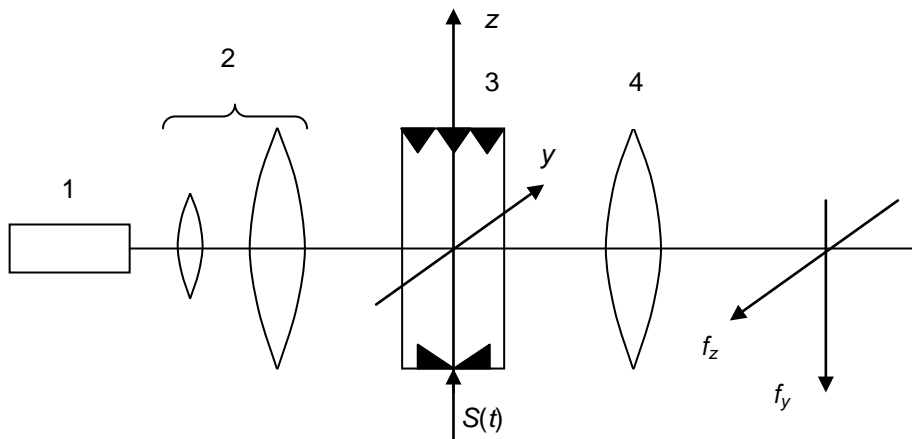


Рис. 5.6. Оптична схема акустооптичного аналізатора спектра

Оскільки комплексна апаратна функція АОСА відповідає реакції на вхідний вплив  $\delta$ -функції, визначимо вираз для неї при впливі гармонійного коливання  $\exp(j\Omega_1 t)$ . При поширенні світлових коливань в оптичній системі АОСА необхідно враховувати вагову функцію вхідної апертури оптичної системи

$$r(y_1 z_1) = \begin{cases} 1, & (y_1 z_1 \leq 0,5D) \\ 0, & (y_1 z_1 > 0,5D) \end{cases}, \text{ де } D - \text{вхідна апертура оптичної системи АОСА.}$$

Двовимірний амплітудно-частотно-фазовий розподіл світлового сигналу на виході оптичної системи АОСА описується виразом:

$$U(y_2, z_2, t) = e^{j\omega_c t} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} r(y_1 z_1) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda_0 f} y_2 y_1\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda_0 f} z_2 z_1\right) dy_1 dz_1, \quad (5.22)$$

де  $\lambda_{\text{про}}$  - довжина хвилі світлового випромінювання,

$f$  - фокусна відстань перетворюючого фур'є-об'єктива.

Тоді комплексна апаратна функція оптичної системи АОСА описується виразом:

$$G(z_2, t, \omega) = \sin c\left(\frac{z_2 L}{\lambda_0 f}\right) \exp[j\Omega_1(t - 0,5T_B)], \quad (5.23)$$

де  $T_B = \frac{D}{V}$  - часова вибірка,

$\Omega_1$  - частота вхідного електричного впливу,

$L$  - довжина акустооптичної взаємодії.

Амплітудно-частотний і фазовий розподіли світлового сигналу у вихідній площині оптичної системи АОСА описано виразом комплексного інтеграла суперпозиції:

$$W_i(t, z_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} W_1(\omega) \cdot G(t, z_2, \omega) d\omega, \quad (5.24)$$

де  $W_1(\omega)$  - спектр динамічного сигналу, що досліджується наприклад, сигналу ВАЕ, ЕРС різання,

$G(t, z_2, \omega)$  - комплексна апаратна функція оптичної системи АОСА.

При аналізі відеосигналу системи АОСА враховується топологія фоточутливого елемента блоку фотореєстрації на основі ПЗЗ-приймача зображення.

Електричний сигнал на виході багатоеlementного безінерційного елемента блоку, що зчитує, визначається як сума сигналів з виходів кожного з елементів фотоприймача, що зчитують:

$$i(N, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(z_2) \cdot |S_2(t, z_2)|^2 dz_2, \quad (5.25)$$

$$A(z_2) = \sum_{n=1}^N r_n [z_2 + z_{2n} - (n-1)d],$$

$$r_n[z_2 + z_{2n} - (n-1)d] = \begin{cases} 1, z_{2n} - (n-1)d \leq z_2 \leq z_{2n} - (n-1)d - a \\ 0, z_2 < z_{2n} - (n-1)d, z_2 > z_{2n} - (n-1)d - a. \end{cases}$$

де  $a$  - ширина фоточутливого елемента ПЗЗ-приймача,

$d$  - крок елементів ґрати ПЗЗ,

$N$  - число елементів ґрати приймача ПЗЗ,

$z_n$  - координата початку ґрати.

Електричний сигнал на виході приймача зображення фотореєстраційного блоку АОСА протягом часового інтервалу  $T_2$  описується інтегральним виразом:

$$I(N) = \frac{1}{T_R} \int_{00}^{T_R} i(N, t) dt = \int_{00}^{T_R} |W_2(t, z_2)|^2 dt \cdot \int_{-k}^k A(z_2) dz_2 \quad (5.26)$$

На підставі виразів (5.23-5.26) визначається вихідний відеосигнал АОСА, що залежить від електричного сигналу на виході багатоелементного фоточутливого приймача:

$$I_1(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_1(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} A(z_2) G_0^2(\omega, z_2) dz_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_1(\omega)|^2 G_2(n, \omega) d\omega, \quad (5.27)$$

що являє собою інтеграл суперпозиції АОСА, що описує розподіл енергетичних параметрів вихідного сигналу.

Тоді енергетична апаратна функція АОСА визначається виразом:

$$G_2(n, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(z_2) \cdot G_0^2(\omega, z_2) d\omega. \quad (5.28)$$

Якщо прийняти вагову функцію багатоелементного фоточутливого приймача як  $\delta$ -функцію по кожному елементу, то апаратна функція АОСА буде визначатися виразом:

$$G_3(n, \omega) = \sum_{i=1}^N \sin^2 0,5 \left\{ \frac{2\pi}{\lambda_0 f} [z_{2n} - (n-1)d] - \frac{\omega}{V_0} \right\} V_0 T_B, \quad (5.29)$$

де  $\lambda_0$  - довжина світлової хвилі,

$f$  - фокусна відстань об'єктива Фур'є,

$V_0$  - швидкість поширення акустичної хвилі у світлозвукпроводі,

$T_B$  - часова вибірка.

Згідно виразу  $d = \lambda_0 f / V_0 T_B$  для розділювальної здатності оптичної системи АОСА, вираз інтеграла суперпозиції для крапкового зчитування може бути

представлено виразом  $I_2(n) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_1(\omega)|^2 G_3(n, \omega) d\omega$ .

Однак, оскільки фоточутливі елементи блоку реєстрації відеосигналу мають кінцевий розмір  $a$ , то ядро інтеграла суперпозиції функція  $G_2(n, \omega)$ , що приводить до перекручування значень енергетичного спектра в крапках відліку. Тоді, наприклад, для першого елемента ґрат фоточутливого приймача



$n = 1$  функція  $G_2(n, \omega)$  описується:

$$G_2(1, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} r(z_{2n} - z_2) \sin c^2 0,5 \left( \frac{2\pi z_2}{\lambda_0 f} + \frac{2\pi t g \theta_i}{\lambda_0} - \frac{\omega}{V_0} \right) V_0 T_B dz_2 \quad (5.30)$$

Отже, отримані вирази для вихідного відеосигналу з фотоприйомного пристрою АОСА залежать від моделі вхідного сигналу і параметрів оптичної системи АОСА для пристрою контролю і діагностики процесу різання.

Важливою задачею при розробці оптико-електронного пристрою контролю якості є підвищення точності оптичної системи для підвищення вірогідності результатів обробки сигналів і визначення критичних ситуацій технологічного процесу механічної обробки матеріалів.

Розробка пристроїв і систем оптичної обробки великих масивів інформації, наприклад, багатоканальних аналізаторів спектрів сигналів, є багатокритеріальним завданням. Важливим аспектом цієї проблеми є метрологічне забезпечення методів високопродуктивної обробки, техніки вимірів; контролю характеристик основних вузлів оптичної системи. Одним з параметрів, що підлягає удосконалюванню є роздільна здатність оптичної системи. Існує кілька шляхів підвищення роздільної здатності: застосуванням аподизації апертури вхідних транспарантів за допомогою напівтонових і бінарних масок; методами часових перетворень (наприклад, компресії) вхідних електричних сигналів; застосуванням конструктивно-схемотехнічних методів, наприклад, багатоканальних акустооптичних модуляторів, підключених до системи ліній затримки; шляхом збільшення ступеню інтеграції фотоприйомного пристрою (збільшення загальної кількості елементів зі зменшенням лінійного розміру); програмними методами корекції відеосигналу на виході оптичної системи. Однак більшість перерахованих методів зв'язані зі складностями їхньої апаратурної реалізації. Тому необхідна оптимізація характеристик оптичної системи, що заснована на методах оптичних перетворень у сполученні з електронними методами формування вхідних електричних сигналів.

Розподіл світлових полів пучків лазерного випромінювання, що розповсюджується в оптичній системі АОСА, залежить від конфігурації та геометричних характеристик резонатора лазера.

Власні функції розподілу світлових полів у резонаторі являють собою нормальні типи електромагнітних ТЕМ коливань (моди): аксіальні і поперечні. Кожній моді відповідають визначені фазові зрушення за один прохід, амплітудно-фазо-частотний розподіл на поверхні дзеркала резонатора, дифракційні втрати, кількість напівхвиль на довжині резонатора. Спектральна ширина моди визначається втратами і стабільністю резонатора при теплових і механічних впливах на систему. Моді стійких резонаторів концентруються в параксіальній області оптичної осі резонатора. Хитливі резонатори генерують моди, що залежать від форми, розмірів і розташування дзеркал у резонаторі, при цьому моди заповнюють цілком весь обсяг резонатора.

Електромагнітні результуючі поля, що формуються в резонаторі, можна

визначити лінійною суперпозицією хвиль  $u(y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i e^{-j\gamma S_i}$ , що поширюються назустріч один одному в просторі по довжині резонатора. Умова генерації аксіальних коливань визначається виразом для частот полю  $\nu_q = Nc/2L$ , де  $N = 1, 2, 3 \dots, L$  - довжина резонатора [5.27]. Поперечні моди визначають поширення плоских хвиль під кутом  $\theta$  до оптичної осі резонатора. При генеруванні поперечних мод когерентність випромінювання падає. Власні функції коливань резонатора утворюють парну безкінечність  $MN$ . Поперечні моди генеруються резонатором за умови:  $\frac{N - \lambda_N/2}{(N + M) \cdot \lambda_N/2} = 1 - \frac{\theta_M^2}{2}$ , де  $M = 1, 2, 3 \dots$ , оскільки величина кута  $\theta_M$  досить незначна.

Розподіл світлового поля на дзеркалах резонатора описується виразом:

$$u_p(y, z) = \left( \frac{1}{\gamma} \right)^p u(y, z),$$

де  $\gamma$  - комплексна постійна,

$u(y, z)$  - постійна для даного резонатора функція розподілу,

$p$  - число проходів у наслідок відбиття від дзеркал резонатора.

Функція розподілу світлових мультиполів на виході резонатора визначається в прямокутній системі координат виразом

$$u(y, z) = H_m \left( \sqrt{2} \frac{y}{w_o} \right) H_n \left( \sqrt{2} \frac{z}{w_o} \right) \cdot e^{-\frac{z^2 + y^2}{w_o^2}}, \quad (5.31)$$

де  $H_{mn}$  - поліноми Ерміта,

$w_o$  - діаметр перетяжки пучка випромінювання лазера.

Приймаючи  $\gamma = \gamma' + j\gamma''$ , можна з урахуванням кривини хвильового фронту світлових пучків, що розповсюджуються визначити моди нижчих порядків  $u_{MN}^{(H)} = A_{MN}^{(H)} \exp(-j\gamma z)$ , використовуючи узагальнений вираз вигляду [5.28]:

$$u_{MN}^{(H)}(\rho, z) = \frac{\sqrt{\pi 2^{M+N-1} M! N!}}{w(z)} H_1 \left( \sqrt{2} \frac{y}{w_o} \right) H_N \left( \sqrt{2} \frac{z}{w_o} \right) \times \\ \times \exp \left[ -j \left( -\frac{M + N + 1}{1 + j\gamma''/\gamma'} \phi(z) + \frac{\gamma \rho^2}{2q} + \gamma z \right) \right], \quad (5.32)$$

де  $q$  - кривина хвильового фронту світлових пучків Гауса,

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}; w(z) = w_o \sqrt{1 + \frac{z}{b^2}}; \phi(z) = \frac{\arctg(z/b)}{1 + j\gamma''/\gamma'}; \quad (5.33)$$

Розподіл світлових пучків першої  $TEM_{01}$  моди в прямокутних координатах Гауса-Ерміта описується виразом:

$$u_{01}^{(H)}(x, y, z) = 2 \frac{y}{z} \cdot e^{j\phi} \left( \sqrt{\frac{2}{\pi}} w \right) \exp \left[ -j \left( \gamma z + \frac{\gamma \rho^2}{2R} - \phi \right) \right] \exp \left( -\frac{\rho^2}{w^2} \right), \quad (5.34)$$

де  $R(z) = z + \frac{b^2}{z}$  - радіус кривини хвильового фронту.

На рис. 5.7 представлені епюри відносного розподілу амплітуд світлових полів лазерного випромінювання, що містять поперечні  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{02}$  моди на виході лінійного резонатора.

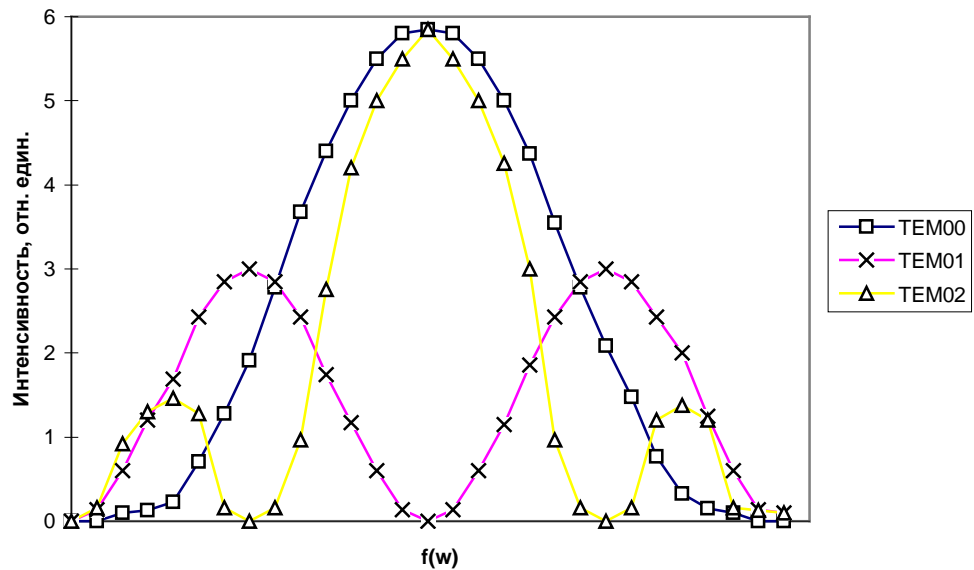


Рис. 5.7. Відносний розподіл інтенсивностей світлових полів лазерного випромінювання, що містить поперечні  $TEM_{00}$ ,  $TEM_{01}$ ,  $TEM_{02}$  моди на виході лінійного резонатора

Порівняємо параметри розподілу мод по частотах наборів максимумів і мінімумів світлового випромінювання. Видно, що при формуванні світлового випромінювання однієї частоти при наявності поперечних мод максимуми розподілу інтенсивності парних мод відповідає мінімумам розподілу непарних мод. Таким чином, можна провести аналогію диференціювання математичної залежності, наприклад,  $\sin c$ -функції. Оскільки ширина дифракційних максимумів при опроміненні високомодовим випромінюванням зменшується з підвищенням порядку моди, то відповідно збільшується здатність оптичної системи розділяти елементи отриманого зображення.

Нижче наведені фотографії деяких просторових сигналів їхніх спектрів і часток похідних спектрів, які практично підтверджують результати теоретичних досліджень (рис. 5.8). Ці фотографії отримані за допомогою експериментальної установки з джерелом когерентного випромінювання у вигляді гелій-неонового лазера ЛГ-78, працюючого в режимі генерації  $TEM_{01}$ -моди. У якості Фурье-

об'єктива використана дволінзова склейка з  $f'' = 350$  мм і  $D_{BX} = 56$  мм. Досліджувані сигнали були виконані фотографічним способом на фотоплівці «Мікрат-300» (в, г) і виготовлені у вигляді бінарних масок з алюмінієвої фольги (а, б).

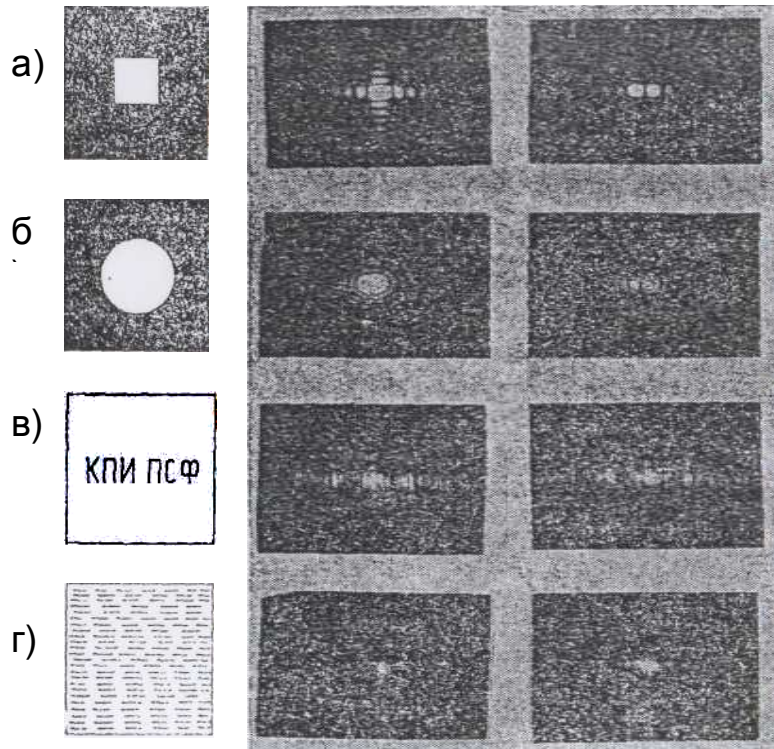


Рис. 5.8. Фотографії деяких просторових сигналів їхніх спектрів і часток похідних спектрів

При зборці оптичної системи КОС для диференціювання спектра сигналів особливу увагу варто звертати на її юстировку. Наявність погрешностей дефокусування й децентрування Фур'є-об'єктива приводить до комплексного виду Фур'є-образа апертури вхідного транспаранта, що, у свою чергу, перекручує похідну Фур'є-образа сигналу. Урахуємо, що спектр апертури вхідного транспаранта буде складатися з амплітудного й фазового спектрів,

$$T_a(f_x, f_y) = T(f_x, f_y) e^{j\varphi(f_x, f_y)}. \quad (5.35)$$

Продиференціював (5.35), наприклад, по координаті  $f_y$ , одержимо частинну похідну Фур'є-образа апертури вхідного транспаранта

$$\frac{dT_a(f_x, f_y)}{df_y} = \left[ T'_{f_y}(f_x, f_y) + j\varphi'_{f_y}(f_x, f_y) T(f_x, f_y) \right] e^{j\varphi(f_x, f_y)}, \quad (5.36)$$

відповідної похідної спектральної щільності. Застосувавши до (5.36) теорему Хіллі [5.29], знайдемо:

$$w_{f_y}(f_x, f_y) = \frac{dT_a(f_x, f_y)}{df_y} \left[ \frac{dT_a(f_x, f_y)}{df_y} \right]^* = [T'_{f_y}(f_x, f_y)]^2 + [\phi'_{f_y}(f_x, f_y)]^2 [T(f_x, f_y)]^2. \quad (5.37)$$

Розглянемо деякі окремі випадки вираження (5.37), що мають місце при фокусуванні оптичної системи КОС. Так, при поперечних децентруваннях на величину  $\Delta x_1$  і  $\Delta y_1$  вхідного транспаранта фазовий спектр його апертури описується залежністю виду

$$\phi(f_x, f_y) = 2\pi(\Delta x_1 f_x + \Delta y_1 f_y), \quad (5.38)$$

при підстановці якої в (5.37), одержимо:

$$w_{f_y}(f_x, f_y) = [T'_{f_y}(f_x, f_y)]^2 + 4\pi^2 \Delta y_1^2 [T(f_x, f_y)]^2. \quad (5.39)$$

Далі, при поздовжньої дефокусування Фур'є-об'єктива, фазовий спектр апертури вхідного транспаранта описується наступним вираженням:

$$\phi(f_x, f_y) = a_x f_x^2 + a_y f_y^2, \quad (5.40)$$

де  $a_x$  і  $a_y$  – коефіцієнти дефокусування, обумовлені геометричними розмірами оптичної системи. Поставивши цей вираз в (5.37), виведемо:

$$w_{f_y}(f_x, f_y) = [T'_{f_y}(f_x, f_y)]^2 + 4a_y^2 f_y^2 [T(f_x, f_y)]^2. \quad (5.41)$$

Аналіз отриманих виражень (5.39) і (5.41) показує, що при дефокусуванні Фур'є-об'єктива, а також децентруванню вхідного транспаранта відбуваються нелінійні перекручування частинної похідної енергетичного спектра його апертури. Ці перекручування приводять, у свою чергу, до асиметрії апаратної функції КОС, тобто знижують його розв'язну здатність за рахунок згладжування крутості максимумів частинної похідної спектра досліджуваного сигналу.

Таким чином, математичні і графічні залежності визначають доцільність застосування освітлення вхідного транспаранта лазерним випромінюванням, що містить вищі моди, для підвищення роздільної здатності оптичної системи аналізатора спектра. При цьому найбільш доцільно з погляду підвищення енергетичних характеристик оптичної системи застосування  $TEM_{01}$ , що доводять вищенаведені ілюстрації, тому що подальше збільшення модового складу випромінювання знижує енергетику системи аналізатора.

Оскільки зміна модового складу лазерного випромінювання залежить від якості юстирування резонатора, практично одержання вищих мод Гауса-Ерміта можна забезпечувати, змінюючи нахил дзеркал резонатора.

Як відомо, підвищення стійкості до перешкод передачі інформації здійснюється за допомогою високочастотної модуляції несучими електричними сигналами, параметри яких характеризують зміну стану процесу, що досліджується. Тому для забезпечення високої чутливості оптико-електронного АТ пристрою до параметрів вхідного сигналу необхідно аналізувати просторово-часові характеристики розподілу амплітуд і фаз світлового сигналу, сформованого під впливом різних видів модуляції електричного сигналу. Модель застосовується до реального динамічного процесу в наближенні миттєвого стаціонарного процесу.

Як довели експериментальні авторські дослідження, ширина спектра  $\Delta f_z$  на виході системи зворотньо пропорційна величині  $A_z$  апертурної діафрагми оптичної системи аналізатора (у напрямку поширення акустичних коливань у середовищі світлозвукопровода АОМ), залежить від геометричних параметрів модулятора, фізико-механічних властивостей середовища АОМ, параметрів досліджуваного електричного сигналу.

Ширина спектра  $\Delta f_z$  зростає зі збільшенням частоти  $f_m$  та амплітуди сигналу, що модулює. Дослідження залежностей, що характеризують розподіли амплітуди і ширини реєструємого спектра, надають можливість відстеження плинності процесу  $U_m(t)$ , оскільки досліджуємий динамічний сигнал характеризує якість процесу різання, стану ТОС.

Контроль якості поточного процесу залежить від точності аналізу параметрів сигналів динаміки різання.

Оскільки балансова модуляція (БМ) дозволяє додатково підвищити розділення шляхом видалення зі спектра центрального максимуму зображення, то оптимальним є введення БМ-сигналів на електричний вхід АОСА.

Крім того, більш економічним з погляду енергетичних характеристик є вид балансової модуляції, коли на вхід АОМ АОСА надходить електричний сигнал виду  $u_{\text{А}}(t) = v(t) \cos \Omega_0 t$ , де  $v(t) = aS(t)$  - що огибає модульований сигнал,  $S(t)$  - довільний неперіодичний сигнал.

Проаналізуємо апаратну функцію АОСА при вхідному балансно-модульованому гармонійному впливі на електричний вхід п'єзоперетворювача АОМ АОСА:

$$S(t) = U(t) \cos \Omega_0 t = aU_m \cos \Omega_0 t, \quad (5.42)$$

де  $a$  - глибина модуляції;

$U_m(t)$  - сигнал, що модулює;

$\Omega_0$  - кругова частота несущого гармонійного високочастотного сигналу, що збігається з власною частотою п'єзоелектричного перетворювача.

Забезпечення максимальної величини електромеханічного к.к.д. і розширення смуги пропускання досягається секціонуванням поверхні п'єзоперетворювача, узгодженого з підсилювачем потужності каналу формування вхідного сигналу.

Якщо представити модель вхідного електричного впливу у виді гармонійного сигналу, промодульованого також гармонійним, одержимо вираження, акустичні коливання поширюються у світлозвукопроводі ортогонально падаючому світловому пучкові випромінювання:

$$u_{bm}(z, t) = au_m(z, t) \cos(\Omega_0 t - K_z^0 z), \quad (5.43)$$

де  $K_z^0$  - компонента хвильового вектора несущих акустичних коливань по осі  $z$ .

Компоненти хвильового вектора однозначно зв'язані з частотами

електричного сигналу  $K_{z_i}^0 = \Omega_i / V_z$ , де  $V_z$  - швидкість поширення акустичних коливань.

Для того, щоб визначити зміни тиску і показника переломлення в середовищі під впливом хвилі, що біжить, знайдемо швидкість поширення акустичних коливань

$$V_{bm}(z, t) = \frac{\partial U_{bm}(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [au_m \cos(\Omega_m t - K_z^m z) \cos(\Omega_0 t - K_z^0)], \quad (5.44)$$

де  $u_m$  - амплітуда акустичних коливань у середовищі АОМ;

$K_z^m$  - компонента хвильового вектора коливань, що модулює досліджувані сигнали уздовж осі  $z$ .

Скориставшись лінеаризованими акустичними рівняннями [5.30, 5.31] і вираженням функції  $n(z, t)$  зміни показника переломлення середовища [5.32], визначимо функцію  $\psi(z, t)$  модуляції світлової хвилі випромінювання лазера дифракційною фазовою решіткою звукопровідності АОМ:

$$\psi(z, t) = \frac{2\pi L}{\lambda_0 V_0} \Delta n V(z, t) \quad (5.45)$$

де  $\lambda_0$  - довжина хвилі світлового випромінювання;

$V_0$  - швидкість поширення акустичних коливань у середовищі світлозвукопроводу;

$n_0$  - показник переломлення середовища;

$\Delta n$  - амплітуда зміни показника переломлення;

$L$  - глибина акустооптичної взаємодії.

Використовуючи вираз для амплітуди акустичних коливань, одержимо вираз, що описує розподіл амплітудно-частотного спектра світлового сигналу як згорткові функції пропущення апертури оптичної системи і функції пропущення АОМ  $T_z = \tau_0 \exp[j\psi(z)]$ , де  $\tau_0$  - коефіцієнт світлопропускання АОМ.

Тоді, скориставшись виразом [5.32] для функції модуляції, одержимо

$$U_{\hat{A}}(f_y, f_z, t) = \int_{-A_y/2}^{A_y/2} \int_{-A_z/2}^{A_z/2} A(\omega, t) t_g(y, z) T(z) \times \exp[-j2\pi(f_y y + f_z z)] dy dz = A_0 e^{-j\omega t} A_y A_z \times \times \sin c A_y f_y \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_m(p) J_k(q) \sin c A_z \times [f_z + m(f_z^0 + f_z^m) - k(f_z^0 - f_z^m)], \quad (5.46)$$

де  $A_0 e^{-j\omega t}$  - світлова хвиля випромінювання лазера,  $\omega$  - частота випромінювання лазера,  $J_m(p), J_k(q)$  - функції Беселя,  $f_z, f_z^0, f_z^m$  - просторові частоти,  $p, q$  - аргументи функцій Беселя, що залежать від потужності  $P_e^m$  акустичних (електричних) коливань, фізичних, геометричних параметрів АОМ:

$$\begin{aligned} p &= \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n \sqrt{\frac{2P_e^m k^2}{\rho_0 V_0^3 F}} a u_m \left( \frac{\Omega_0}{\Omega_m} - 1 \right), \\ q &= \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n \sqrt{\frac{2P_e^m k^2}{\rho_0 V_0^3 F}} a u_m \left( \frac{\Omega_0}{\Omega_m} + 1 \right), \end{aligned} \quad (5.47)$$

де  $A_y, A_z$  - розміри прямокутної апертури АОМ уздовж координат  $Y, Z$ ;

$F$  - активна площа п'єзoeлемента.

Фур'є-образ світлового сигналу, промодульованого фазовими дифракційними ґратами АОМ, містить еквідистантно розташовані максимуми на відстанях, пропорційних частоті огинаючої електричного сигналу при відсутності постійної складової спектру, обумовленою функцією Беселя нульового порядку.

Визначаючи по теоремі Хіллі з урахуванням виразів (5.46, 5.47) спектр потужності світлового сигналу на виході оптичної системи, одержимо:

$$\begin{aligned} W(f_y, f_z, t) &= \tau_0^2 (A_y, A_z)^2 \cdot \\ &\cdot \left\{ \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_m(p) J_k(m) \cdot \sin c A_z \left[ f_z + m(f_z^0 + f_z^m) - k(f_z^0 - f_z^m) \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (5.48)$$

При цьому дифракційні максимуми його визначені просторовими частотами:

$$f_z = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} -m(f_z^0 + f_z^m) + k(f_z^0 - f_z^m), \quad (5.49)$$

Оптичні частоти на підставі доплеровського ефекту:

$$\begin{aligned} v_{-n} &= v + m(f^0 + f^m) - k(f^0 - f^m), \\ v_n &= v - m(f^0 + f^m) + k(f^0 - f^m), \end{aligned} \quad (5.50)$$

де  $n$  - порядковий номер дифракційного максимуму.

Проведені вище дослідження показали, що підвищення точності і вірогідності аналізу спектрально-кореляційних характеристик електричних сигналів, що досліджуються у системі АОСА спостерігається при збільшенні роздільної здатності оптичної системи аналізатора спектра. Тому на підставі попередніх висновків можна здійснити комбінаційний комплексний метод, що дозволить поліпшити вірогідність контролю якості плинного технологічного процесу механічної обробки деталей і застосувати його для систем автоматизованого контролю і керування.

Метод підвищення роздільної здатності оптичної системи АОСА електричних сигналів заснований на застосуванні сполучення методів модуляції вхідних сигналів з одночасним освітленням апертури вхідного транспаранта випромінюванням, що містить гаусові пучки з поперечним розподілом інтенсивності, що відповідає першій поперечній моді Гауса-Ерміта.

Оптична система пристрою, що реалізує пропонований метод, містить



лазер з модовим складом випромінювання, що перебудовується; телескопічну систему для розширення світлового пучка, встановлену перед вхідним транспарантом. На вхід дифракційного АОМ, що працює в режимі дифракції Рамана-Ната, у підключена система формування вхідного електричного сигналу на основі балансового модулятора. Центральний пелюсток діаграми спрямованості в режимі акустичних коливань, що біжать, максимальний у напрямку осі їхнього поширення в середовищі світлозвукопровода. Бічні пелюстки діаграми і коефіцієнт відображення акустичних хвиль від стінок корпусу АОМ мінімальні, що досягається оптимізацією геометричних і фізико-механічних властивостей АОМ. При цьому переключування при перетворенні вхідного сигналу в акустичний зведені до мінімальних, котрими можна знехтувати.

Розділювальна здатність АТ аналізатора спектра визначається розмірами і формою вхідної апертури оптичної системи, а також просторовим розподілом амплітуди світлової хвилі в пучку, що освітлюється. Тому, освітлюючи вхідне світлове вікно АОМ випромінюванням, що містить вищі поперечні моди Гауса-Ерміта, можна виконати диференціювання Фур'є-образа сигналу за відповідною просторовою частотою. Порядок похідної дорівнює порядковому номеру поперечної моди випромінювання в площині вхідної апертури АОМ.

Для визначення параметрів Фур'є-образа досліджуваного електричного сигналу скористаємося математичними співвідношеннями (5.46, 5.47). Отриманий вираз (5.46) продиференціюємо по просторовій частоті  $f_z$ , розподіл якої реєструється в площині спектрального аналізу оптичної системи АОСА.

Отже, при освітленні світловим пучком, поперечний розподіл інтенсивності якого відповідає  $TEM_{01}$  моді Гауса-Ерміта по осі, одержимо залежність [5.26]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial f_z} [U_{bm}(f_y, f_z, t)] &= L \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_m(p) J_k(q) \frac{\partial}{\partial f_z} \left\{ \sin c A_z [f_z + m(f_z^0 + f_z^m) -] \right\} = \\ &= -k(f_z^0 - f_z^m) \} = L \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_m(p) J_k(q) \frac{1}{f_z + m f_z^B - k f_z^H} \cdot \\ &\cdot \left\{ \frac{\cos \pi A_z [f_z + m f_z^B - k f_z^H]}{f_z + m f_z^B - k f_z^H} - \sin c A_z [f_z + m f_z^B - k f_z^H] \right\}, \end{aligned} \quad (5.51)$$

де

$$\begin{aligned} L &= \tau_0 A_0 A_y A_z \sin c A_y f_y, \\ f_z^B &= f_z^0 + f_z^m, f_z^H = f_z^0 - f_z^m. \end{aligned} \quad (5.52)$$

Аналіз отриманого виразу показує зменшення ширини амплітудно-частотного розподілу дифракційних максимумів Фур'є-образа, що призводить до підвищення розділення кількості елементів у площині спектрального аналізу оптичної системи АОСА.

На рис. 5.9 приведені фотографії спектра вхідного балансно-модульованого сигналу при збільшенні оптичної системи  $\beta = 200\times$ . Експерименти проводилися при використанні об'єктива з фокусною відстанню 180 мм у якості перетворюючого об'єктива Фур'є, розробленого дифракційного АОМ, джерела випромінювання – He-Ne лазера з перебудовувемим модовим складом випромінювання (ЛГ-75).

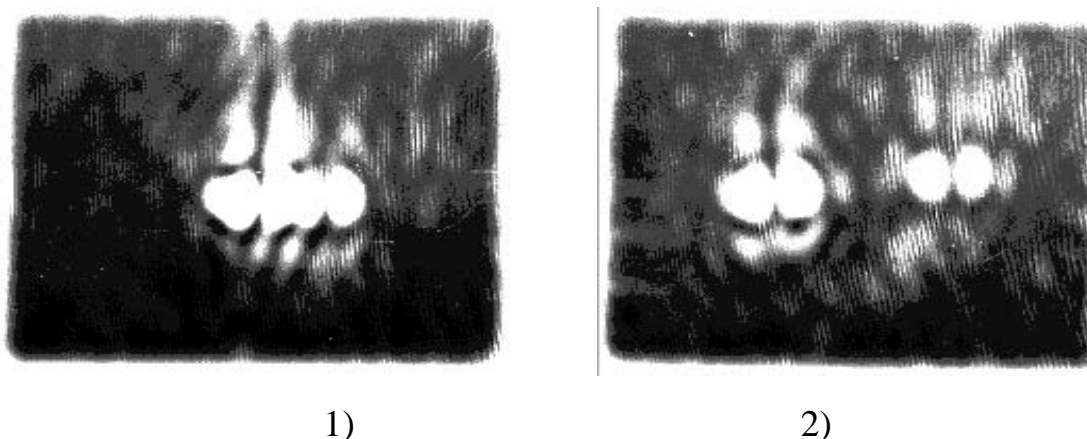


Рис. 5.9. Фотографія спектру балансно-модульованого віброакустичного сигналу при  $f_o = 10$  МГц з частотами сигналу відчутника:  
1 -  $f_m = 40$  кГц, 2 -  $f_m = 180$  кГц

На рис. 5.10 приведені порівняльні результати чисельних розрахунків виразів, що описують розподіл інтенсивності світлового випромінювання в площині спектрального аналізу оптичної системи обробки [5.26].

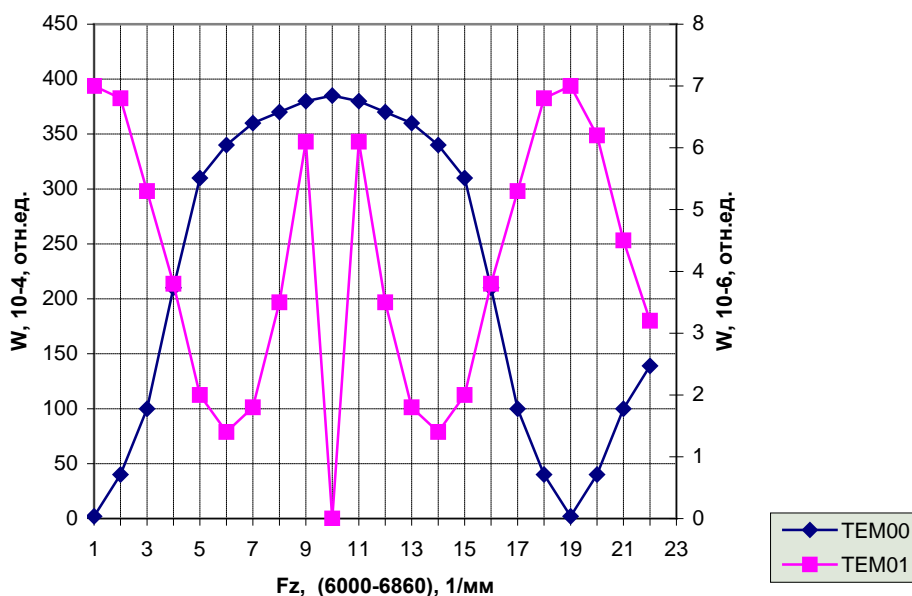


Рис. 5.10. Графік відносної залежності просторового розподілу інтенсивності світлового пучка в спектральній площині оптичної системи

Приведені результати дослідження показали, що ширина максимуму при диференціюванні Фур'є-образа сигналу зменшується, тому спостерігається підвищення роздільної здатності оптичної системи, що дозволяє, АТ аналізатора, що дає змогу визначити, що застосування операції диференціювання Фур'є-образа вхідного сигналу дозволяє підвищити роздільовальну здатність оптичної системи у 1,6 - 1,7 рази шляхом освітлення вхідної апертури АОМ пучком світлового випромінювання, поперечний розподіл якого відповідає першій поперечній моді Гаусса-Ерміта; а також використання БМ досліджуваного низькочастотного електричного сигналу в АТ аналізаторі спектра дозволяє також підвищити розділення дифракційного зображення.

Можна розглядати процес аналізу сигналів динаміки різання з іншого боку, коли оптична система будується інтегрованою. Визначення стану ТОС, РІ, деталі під час технологічної обробки здійснюємо шляхом комбінованого аналізу поверхневих ефектів, що виникають, власної інженерії поверхні та об'ємних акустичних та електромагнітних ефектів, які виникають безпосередньо в матеріалі РІ та заготовки. При цьому для реєстрації, наприклад, використовуємо модуляцію вхідних сигналів, що надходять з відчутників електромагнітних полів та акустичних коливань.

Оскільки функція  $T_z = \tau_0 \exp[j\psi(z)]$  пропускання апертури є залежною також від світлового сигналу, що відбивається від поверхневої акустичної ґратки, яка створюється під впливом шорсткості поверхні. Тоді, використовуючи вирази для функції модуляції, отримані раніше, можна визначити розподіл світлових полів на виході системи, як

$$U_{bm}(f_y, f_z, t) = \int_0^T A(\omega, t) dt \int_{-D_y/2}^{D_y/2} \int_{-D_z/2}^{D_z/2} t_g(y, z) T(z) \exp[-j2\pi(f_y y + f_z z)] dy dz =$$

$$= A^0 e^{-j\omega t} D_y D_z \sin c D_y f_y \cdot \quad (5.53)$$

$$\cdot \sum_{n=1}^{n=\infty} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} J_m(p) J_k(q) J_n(\aleph) \sin cn(f - f_n) \sin c D_z [f_z + m(f_z^0 + f_z^m) - k(f_z^0 - f_z^m)],$$

де  $A(\omega, t)$  - світлова хвиля з врахуванням модулюючих ефектів поверхневих акустичних явищ та параметрів формотворення поверхні деталі,

$A^0 e^{-j\omega t}$  - світлова хвиля випромінювання лазера,

$\omega$  - частота випромінювання лазера,

$J_m(p), J_k(q), J_n(\aleph)$  - функції Бесселя,

$f_z, f_z^0, f_z^m, f_z^n$  - просторові частоти,

$p, q, \aleph$  - аргументи функцій Бесселя, котрі залежать від потужності  $P_e^m$  акустичних об'ємних та поверхневих коливань, фізичних, геометричних параметрів АОМ:

$$\begin{aligned}
p &= \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n \sqrt{\frac{2P_e^m k^2}{\rho_0 V_0^3 F}} a u_m \left( \frac{\Omega_0}{\Omega_m} - 1 \right), \\
q &= \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n \sqrt{\frac{2P_e^m k^2}{\rho_0 V_0^3 F}} a u_m \left( \frac{\Omega_0}{\Omega_m} + 1 \right), \\
\aleph &= \alpha \frac{R_{\max} - R_{\min}}{T} \cdot \frac{1}{\sin \theta_n}
\end{aligned} \tag{5.54}$$

де  $D_y, D_z$  - прямокутна апертура АОМ вздовж координат  $Y, Z$ ;

$F$  - активна площа п'єзоелемента.

Фур'є-образ світлового сигналу, промодульованого фазовою дифракційною ґраткою АОМ, містить еквідистантні максимуми на відстанях, пропорційних частоті огинаючої електричного сигналу у відсутності постійної складової спектру, що визначена функцією Бесселя нульового порядку.

Якщо визначити згідно теореми Хиллі [5.33, 5.34] спектр потужності світлового сигналу на виході оптичної системи, отримаємо:

$$W(f_y, f_z, t) = \tau_0^2 (D_y, D_z)^2 \cdot$$

$$\left\{ \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} \sum_{n=1}^{\infty} J_m(p) J_k(m) J_n(\aleph) \cdot \sin cn(f - f_n) \sin cD_z \left[ f_z + m(f_z^0 + f_z^m) - k(f_z^0 - f_z^m) \right] \right\}^2 \tag{5.55}$$

При цьому дифракційні максимуми його визначені просторовими частотами:

$$f_z = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} -m(f_z^0 + f_z^m) + k(f_z^0 - f_z^m),$$

де  $n$ ,  $n$ - порядковий номер дифракційного максимуму, часові частоти  $f = f_n$ .

Математична модель визначення плинного стану РІ можна надати з врахуванням залежності спектрально-кореляційних характеристик сигналів, що реєструються залежно від розподілу густин ймовірностей параметрів амплітуд  $x_m$ , частот  $\Omega_m$  і фаз  $\varphi_m$  сигналу  $x(t)$  на інформативному вході системи [5.35, 5.36]. Тому необхідно провести усереднення за розподілом густин ймовірностей: по цим параметрам  $p_{x_m}(x_m), p_{\Omega_m}(\Omega_m), p_{\varphi_m}(\varphi_m)$ .

Амплітуда розподілу світлового поля в площині спектрального аналізу системи аналізатора визначена геометричними параметрами дифракційного АОМ, характеристиками оптичної системи лазерного аналізатора, а також статистичними середніми величинами процесу, що досліджується. Зі збільшенням дисперсії розподілу густини ймовірності амплітуди сигналу (при решті незмінних параметрів) пік інтенсивності відеосигналу в першому дифракційному максимумі повинен змінюватися зі збільшенням ширини максимуму та зменшенням амплітуди. Це вказує на збільшення поверхні контакту різальної частини РІ та поверхні заготовки, що оброблюється.

Збільшення амплітуди сигналу ВАЕ, що означає зростання зносу РІ, призводить до зростання інтенсивності в дифракційному максимумі.

Проте застосування подібних схем є обмеженим і стосується лише механічної обробки надточних поверхонь, оскільки хвилястість, шорсткість оброблюваної поверхні можуть надавати негативний вплив на точність вимірювань. Окрім того, обробка деталі повинна бути без застосування мастильно-охолоджувального технологічного середовища (МОТС), оскільки їх наявність не дозволяє контролювати стан технологічного процесу прямим оптичними методами. Похибки вимірювань нестабільні, оскільки світлова хвиля після віддзеркалення від поверхні може модулюватися величинами більшого рівня, чим рівень параметрів інформативного сигналу.

Акустооптичні системи обробки сигналів, котрі надходять від технологічного обладнання через відчутники та електронні канали формування (підсилення, фільтрації, модуляції тощо), можуть бути побудовані, виходячи з різних принципів обробки оптичних зображень.

### **§ 5.3.2. Пристрої аналізу спектрально-кореляційних характеристик електричних сигналів**

Лазерний аналізатор сигналів вібрацій інструмента, побудований, наприклад за схемою [5.37] (рис. 5.11), дозволяє реєструвати спектральні характеристики сигналу вібрацій.

Пристрій складається з оптичного когерентного спектроаналізатора 1, електронного вузла 2 формування команд керування ТО. Відчутник 12 вібрацій побудований на рефлектометричному методі та містить волоконно-оптичний світловод з волоконними каналами, оптично узгодженими з некогерентним джерелом випромінювання та фотоприймачем, підключеним до електронного каналу реєстрації. При реєстрації вібрацій світловий потік, відображений від поверхні різального інструмента, модулюється по інтенсивності вібраціями, поступаючи в фотоприймач 13, виконаний на основі фотодіода, формує електричний сигнал в електронному каналі підсилення та фільтрації. Змінна складова сигналу є вихідною інформацією для аналізу частотного діапазону вібрацій різального інструмента шляхом обробки в когерентному АОСА, для чого в схему введений дифракційний АОМ.

Оскільки звичайні фотоприймачі чутливі до інтенсивності світла, котра пропорційна квадрату амплітуди, то при реєстрації спектра відбувається втрата фазового спектру. Для попередження цього введена опорна хвиля за допомогою напівпрозорого дзеркала та відбивача. Відбувається реєстрація результуючого амплітудно-фазо-частотного розподілу у вихідній площині спектроаналізатора, котрий формується як наслідок інтерференції спектра сигналу вібрацій з опорною хвилею. Блок формування керуючих команд порівнює сигнал, що надходить від фотоприймального блоку реєстрації енергетичного спектра сигналу у вихідній площині оптичної системи, із записаною еталонною уставкою.

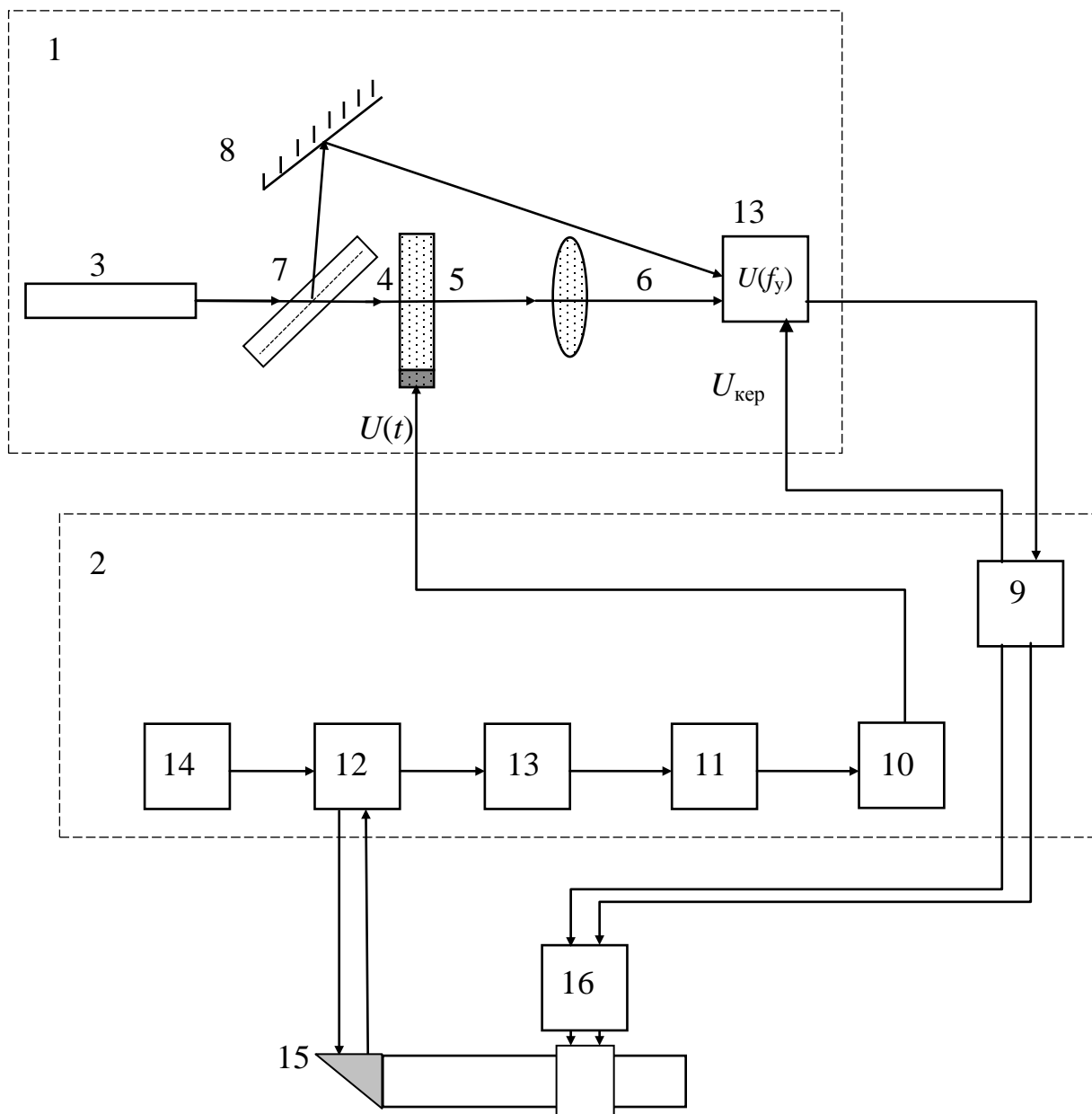


Рис. 5.11. Функційна схема пристрою керування металорізальними верстатами, де: 1 – когерентний спектроаналізатор, 2 – електронна система формування команд, 3 – лазер, 4 – АОМ, 5 – Фур'є-об'єктив, 6 – телевізійна трубка, 7 – напівпрозоре дзеркало, 8 – дзеркало, 9 – блок обробки інформації, 10 – фільтр, 11 – підсилювач, 12 – оптоволоконний відчутник вібрацій, 13 – фотоприймачі, 14 – джерело світла, 15 – різальний інструмент, що контролюється, 16 – рушії верстата

Лазерний оптико-електронний пристрій здійснює паралельний контроль також по силовим параметрам різання з урахуванням жорсткості системи ТО

для підвищення достовірності керування металорізальним верстатом.

Проте ця система має деякі недоліки. Некогерентний волоконно-оптичний відчутник вібрацій, що використовує зміни інтенсивності відображеного світлового потоку, є фільтром високих частот досліджуваного сигналу. Тому лазерний аналізатор призначений для контролю якості технологічного процесу різання тільки за низькочастотними складовими близько  $(5 \div 10)$  кГц спектра сигналів вібрацій у зоні різання.

Крім того, для точності реєстрації механічних переміщень на поверхні РІ в період обробки, необхідно, як і при застосуванні прямих оптичних методів, спеціальні умови обробки: обдув зони різання від стружки, відсутність МОТС, масляних туманів тощо, що значно ускладнює процес контролю стану інструмента в реальних виробничих умовах.

Оскільки електричні сигнали, що характеризують динаміку процесу механообробки, звичайно інформативні в деяких частотних діапазонах (5 – 10 кГц, 20-300 кГц, 1-10 Гц), необхідно для підвищення точності аналізу та діагностики якості плинного процесу паралельний аналіз вузьких смуг широкопasmового сигналу.

Підвищення розділювальної здатності досліджуваних сигналів забезпечує оптична система спектроаналізатора [5.38], що містить дифракційний АОМ у вигляді напівсфери (рис. 5.12), лазер з перестроюваними частотами резонатора. АОСА містить електронну систему перетворення вхідного електричного сигналу у вигляді БМ колювання для зниження енергоємності системи та підвищення розділювальної здатності вихідного відеосигналу оптичної системи обробки інформації.

Багатоканальний електронний блок містить передвчасний підсилювач, систему смугових фільтрів, генератор опорних напруг, підключений до каналів балансних модуляторів, підсилювачі потужності. Канали підсилювача потужності містять пристрій узгодження з п'єзоперетворювачами багатоканального АОМ.

П'єзоперетворювачі нанесені на сферичну поверхню АОМ по твірній на рівній відстані, що дозволяє фокусувати акустичні пучки в центрі напівсфери, що розташована на оптичній осі АОСА.

Сферично-опукла поверхня п'єзоперетворювачів АОМ коригує розширення смуги пропускання системи по частоті досліджуваного сигналу. При цьому весь широкопasmовий сигнал з електричного входу АОСА реєструють в різних ділянках частотного діапазону  $\Delta f_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) паралельно.

Пучок вихідного випромінювання лазера розширюється коліматором та направляється на поверхню АОМ так, щоб його вісь проходила через центр півсфери, але не перетинала твірну, на якій нанесені п'єзоперетворювачі. За вихідним вікном АОМ на протилежній точці діаметра АОМ фокусують світловий пучок випромінювання, що представляє собою дифракційне

зображення світлового сигналу, промодульованого по фазі сукупністю балансно-модульованих акустичних коливань  $U_i(t)$  у дифракційних решітках звукопроводу АОМ. Для збільшення масштабу зображення за вихідним вікном АОМ на оптичній осі розташована короткофокусна лінза, що дозволяє зменшити габарити оптичної системи.

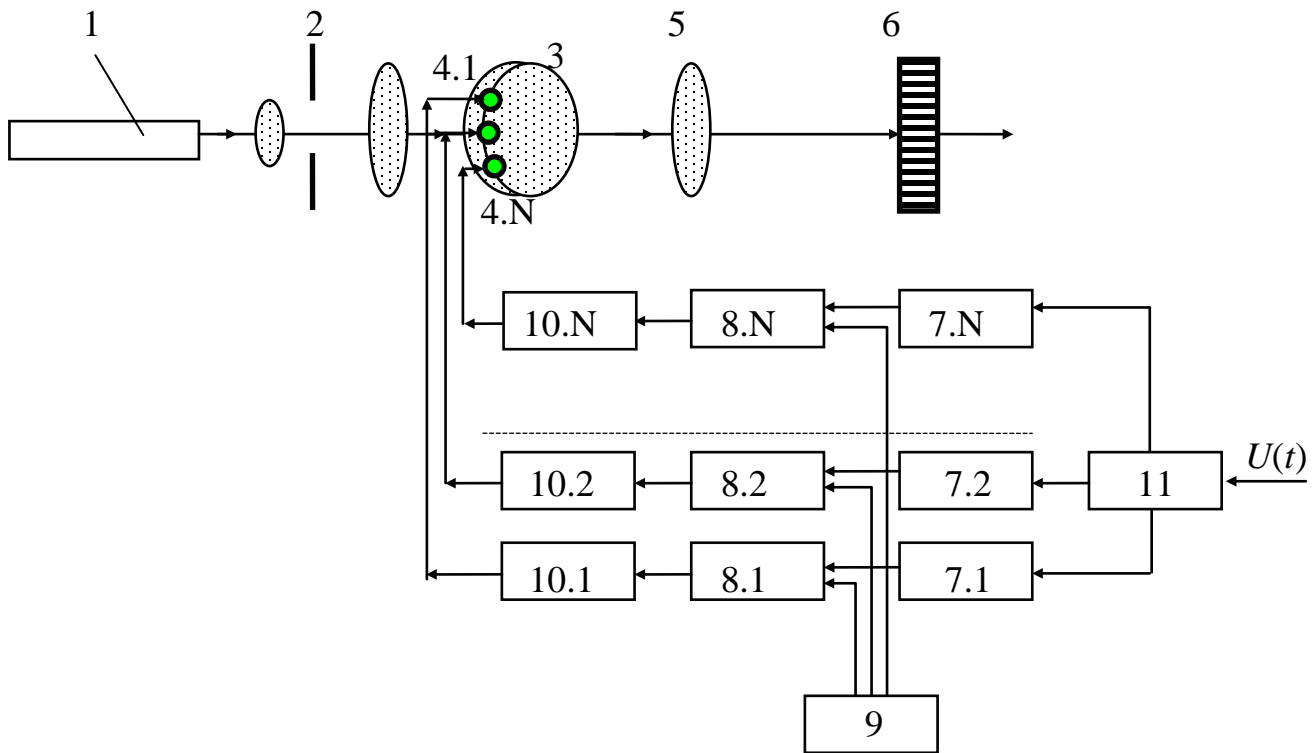


Рис. 5.12. Структурна схема АОСА аналізу широкосмугових сигналів, де: 1 – лазер, 2 – коліматор, 3 – АОМ, 4 – п'єзоперетворювачі, 5 – масштабуюча лінза, 6 – блок реєстрації оптичного зображення, 7 – блок смугових фільтрів, 8 – багатоканальний балансний модулятор, 9 – генератор опорних напруг, 10 – підсилювачі потужності, 11 – попередній підсилювач сигналів відчутника

Енергетичний спектр досліджуваного сигналу реєструється фотоприйомним пристроєм, розташованим у вихідній площині оптичної системи. Для підвищення роздільної здатності оптичної системи АОСА вхідне випромінювання лазера містить вищі поперечні моди Гауса-Ерміта. При освітленні вхідного вікна АОМ, як було розглянуто в § 5.3.1, на вихідному вікні відбувається диференціювання вихідного амплітудно-фазо-частотного розподілу світлового сигналу, модульованого вхідним сигналом  $U_i(t)$ . При цьому зменшується інтегральна площа розподілу кожного з дифракційних максимумів у площині фотоприймальних чутливих елементів блоку фотореєстрації.



Підвищення точності аналізу спектральних характеристик електричних сигналів здійснюється в оптичній системі АОСА [5.39] введенням двох додаткових фазових дифракційних решіток (рис. 5.13), збільшенням кутової апертури оптичної системи.

Світловий потік випромінювання лазера з плоским фронтом, сформований системою лінз коліматора надходить на оптичний вхід АОМ, у світлозвукопроводі якого формуються фазові дифракційні решітки під впливом досліджуваного електричного сигналу, що надходить на вхід п'єзоперетворювача.

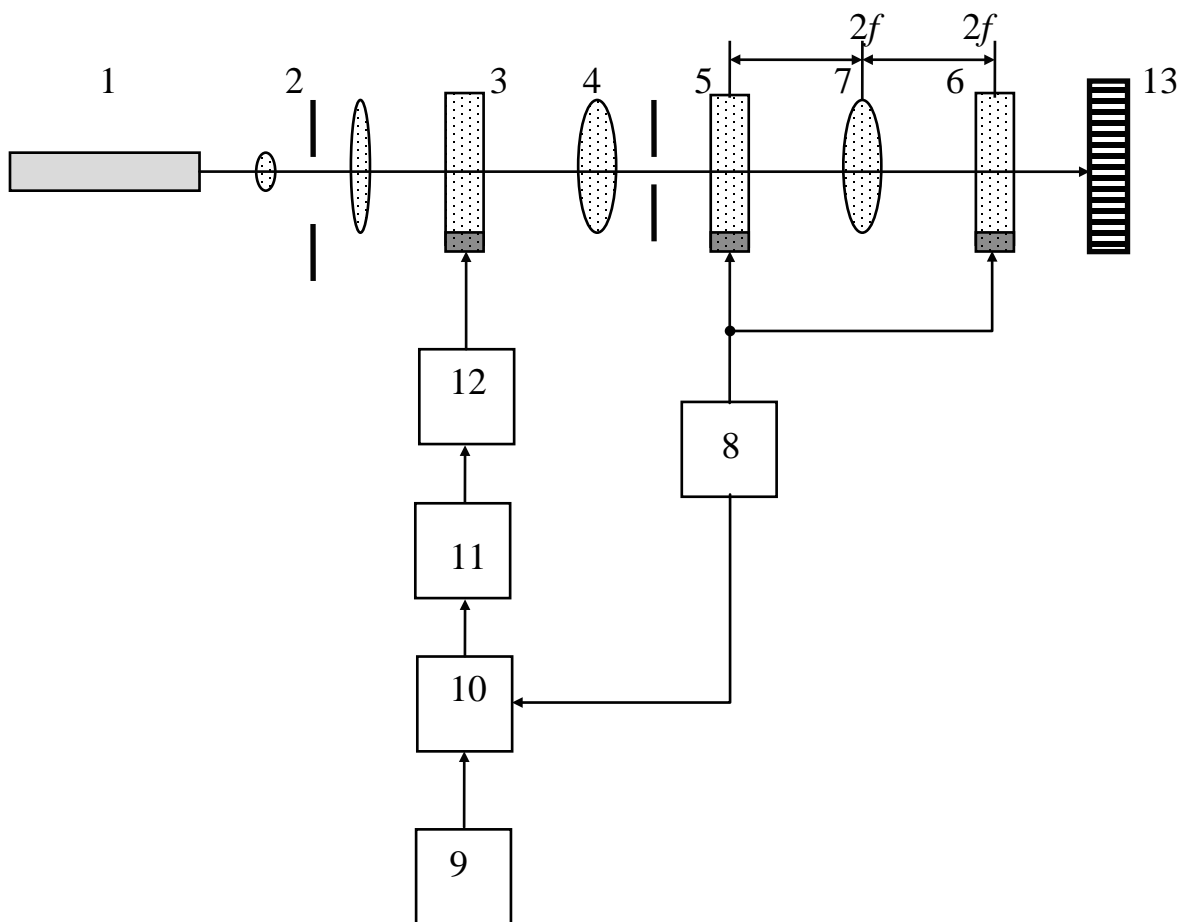


Рис. 5.13. Структурна схема АОСА електричних сигналів, де: 1 - лазер, 2 - коліматор, 3, 5, 6 - АОМ, 4 - Фур'є-об'єктив, 7 - об'єктив, 8 - генератор опорних сигналів, 9 - модуль реєстрації сигналів, 10 - балансовий модулятор, 11 - перемножувач частот, 12 - підсилювач потужності, 13 - блок фотореєстрації

Електронна система формування вхідного досліджуваного електричного сигналу так само, як і в попередньому лазерному пристрої, містить балансовий

модулятор із підключеними до нього генератора опорного сигналу і пристроєм реєстрації сигналу, що досліджується. Спектр сигналу балансового модулятора містить тільки гармоніки спектра сигналу, що досліджується з подавленою несучою. Помножувач частот здійснює помноження частот вихідного сигналу балансового модулятора для того, щоб збільшити відстань між дифракційними максимумами світлового потоку на виході оптичної системи АОСА. Вихід підсилювача потужності сигналу, встановленого на виході помножувача частот, містить узгоджуюче навантаження для підключення каналу електронного блоку до п'єзоперетворювача АОМ.

Просторовий амплітудно-частотний спектр світлового сигналу формується в задній фокальній площині фур'є-об'єктива. Додаткові оптично сполучені дифракційні АОМ, електричні входи яких підключені до генератора опорних сигналів, встановлені за задньою фокальною площиною фур'є-об'єктива. Між модуляторами розташований об'єктив так, щоб відстань між поверхнями першого АОМ і об'єктива та від об'єктива до другого АОМ попереднього дорівнювали подвійній фокусній відстані об'єктива. Введення першого АОМ в оптичну систему АОСА еквівалентно появі декількох точкових джерел, зрушених один щодо іншого, ідентичних першому джерелу в задній фокальній площині Фур'є-об'єктива. Другий додатковий АОМ формує в площині зображень дифракційні максимуми на відстанях, що перевищують первісні. Це відбувається внаслідок дифракції світлових хвиль, що виходять із точкових джерел, що формує дифракційні решітки першого АОМ, на дифракційних решітках світлозвукопроводу другого АОМ.

У вихідній площині оптичної системи АОСА, розташований блок фотоприймального модуля, що реєструє енергетичний спектр досліджуваних сигналів з підвищенням розділенням завдяки збільшенню кутової апертури оптичної системи аналізатора, що підвищує точність аналізу електричних досліджуваних сигналів і діагностики плинного стану динамічного процесу.

### **§ 5.3.3. Лазерні пристрої параметричного контролю динамічних сигналів технологічного процесу різання**

Пристрій керування процесом різання [5.40] (рис. 5.14) здійснює рівнобіжний аналіз на основі аналізу сигналу ВАЕ та термоЕРС у зоні обробки. Оптиволоконний чутник термоЕРС виконаний з магнітооптичного матеріалу. Світловий потік випромінювання лазера надходить через світловід. Під дією змінної складової термоЕРС, що виникає в зоні різання, змінюється показник заломлення оптичного світловода, що забезпечує амплітудну модуляцію світлової хвилі. Вихід світловоду сполучений з анаморфотною оптичною системою, що містить розташовані на одній оптичній осі сферичну і дві циліндричні лінзи. Обидві циліндричні лінзи мають взаємно перпендикулярні утворюючі циліндричних поверхонь. Кривина поверхні першої лінзи рівнобіжна напрямку поширення акустичних коливальних процесів у

звукопроводі АОМ, що встановлений між лінзами. На електричний вхід АОМ надходить сигнал ВАЕ. У площині фокусування розташований ПЗЗ-фотоприймач, вихід якого з'єднаний через АЦП до входу обчислювального пристрою.

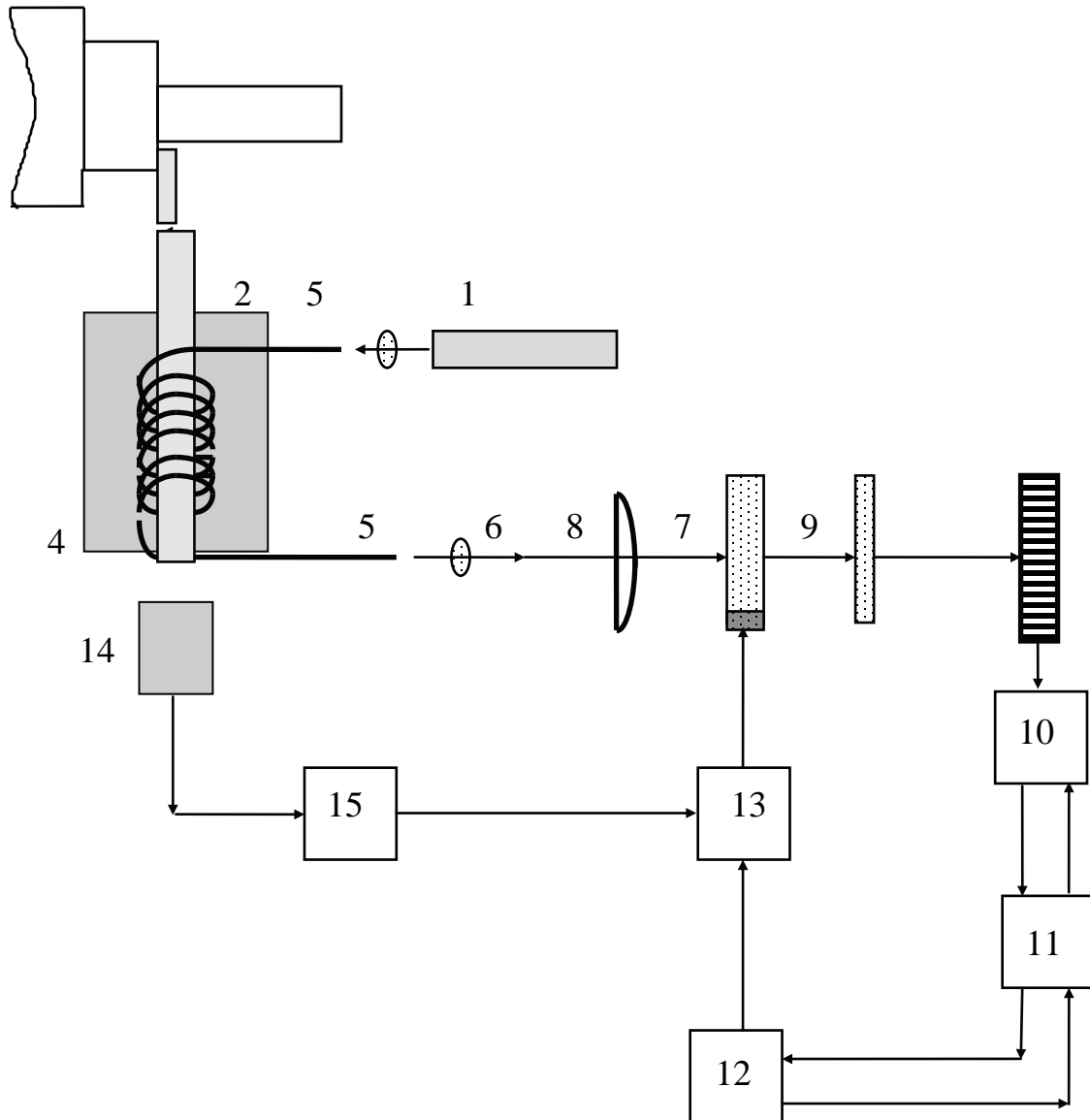


Рис. 5.14. Структурна схема пристрою керування процесом різання: 1 – лазер, 2 – магнітооптичний відчутник, 3 – різальний інструмент, 4 – супорт, 5 – сферичні лінзи, 6, 7 – циліндричні лінзи, 8 – АОМ, 9 – фотоприймач, 10 – блок живлення, 11 – АЦП, 12 – обчислювальний пристрій, 13 – генератор, що задає, 14 – відчутник ВАЕ, 15 – підсилювач

На ПЗЗ-приймачі зображення сформоване взаємним енергетичним спектром сигналів термоЕРС і ВАЕ, що являє собою розподіл світлового

поток по входній апертурі фотоприймача і змінюється в часі відповідно до модуляції світлового потоку на вихідному торці світловоду. При досягненні просторовими та енергетичними параметрами спектра заданих критичних значень формуються керуючі команди на корекцію режимів різання з урахуванням фізико-хімічних параметрів пари "інструмент-деталь".

Можливість керування групою металорізальних верстатів може досягатися за допомогою адаптивних багатоканальних пристроїв керування [5.41], які дозволяють аналізувати кореляційні характеристики сигналу ВАЕ. Оптична система АОСА електричних сигналів містить лазер з довжиною хвилі, що перебудовується, світлоподілюючий елемент, оптичні затвори, що керуються від основного блоку керування системою, багатоканальні дифракційні АОМ, на виході яких утворюються світлові поля, що залежать від параметрів вхідного електричного сигналу  $U_1(t)$ .

Принцип роботи системи полягає в наступному. Пучок випромінювання лазера (з довжиною хвилі  $\lambda_1$ ) розділений на три пучки світлоподілюючою призмою. При відкритому затворі світловий пучок надходить на елемент реєстрації зображення, наприклад, фототермопластичної. Другий пучок випромінювання надходить через другий оптичний затвор на оптичні входи блоку АОМ. На електричні входи блоку АОМ надходять сигнали від відчутників ВАЕ. У вихідній площині оптичної частини формується просторовий спектр, параметри якого характеризують параметри ВАЕ в початковий період процесу різання. Після цього оптичний затвір закривається, і світловий пучок через фазообертач надходить на елемент фотореєстрації з фазовим зрушенням  $\pi/2$ . Виходячи з характеристик оброблюваності матеріалу заготовки, визначається інтервал часу, через який спрацьовує електронний канал реєстрації ВАЕ. Інша частина пучка випромінювання (з довжиною хвилі  $\lambda_2$ ) надходить на другий блок АОМ, що формує Фур'є-образ сигналів ВАЕ.

На рис. 5.15 наведено структурну схему узагальненого лазерного багатоканального АО аналізатора для застосування у діагностиці та контролі стану процесу механічної обробки різанням на верстатах з ЧПК.

Оскільки спектри динамічних сигналів, що реєструються на початку та кінці періоду стійкості РІ, зрушені по фазі на  $\pi/2$ , то на елементі реєстрації зображення реєструється сигнал порівняння спектрів  $U_{pi}(f_x, y_i)$ , що характеризує ступінь зносу різальної крайки інструмента.

Автокореляційна функція енергетичного різницевого спектра зношеного інструмента формується в задній фокальній площині Фур'є-лінзи, зчитується блоком фотореєстрації (на основі ПЗЗ-приймача).

Вихідний сигнал фотоприймального пристрою, що відповідає величині автокореляційної функції, надходить на входи блоку керування і формування керуючих команд для виконавчих органів верстата.

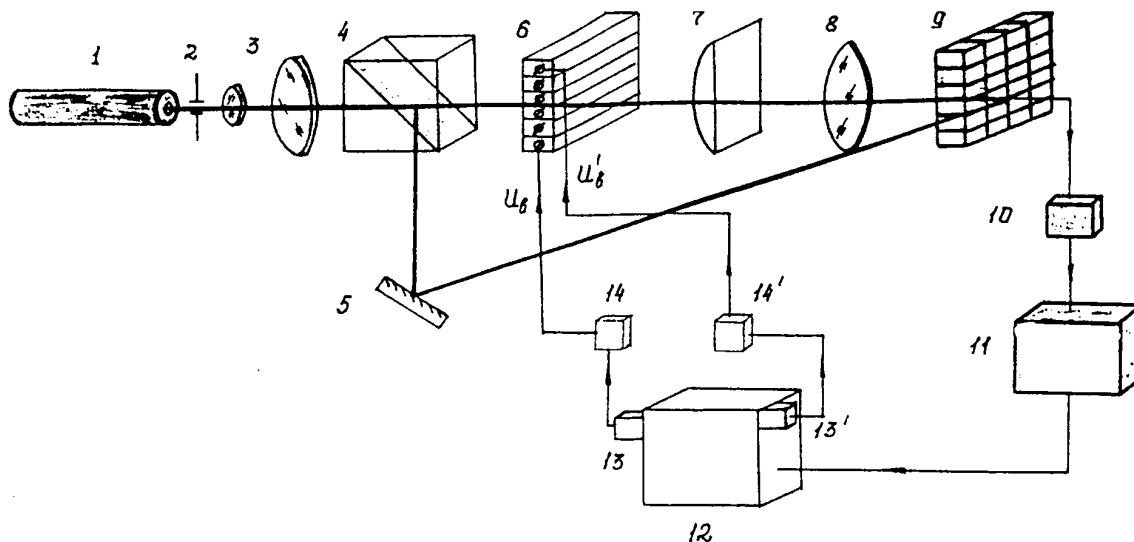


Рис. 5.15. Узагальнена схема лазерної АО системи групового керування верстатами: 1 - лазер, 2 -діафрагма, 3 - коліатор, 4 - світлоподілюючий куб, 5 - дзеркало, 6 - АОМ, 7 – Фур'є-об'єктив, 8 - масштабуюча оптика, 9 - ПЗЗ-матриця, 10 - АЦП, 11 – система ЧПК, 12 - система ТО (парк верстатів), 13,13' - відчутники динаміки різання, 14,14' - електронна система формування сигналів

Перспективним напрямком обробки оптичних зображень є аналіз кепстрів електричних сигналів. Кепстральна обробка використовується в задачах обернення згортки двох функцій [5.42]. При переході у Фур'є-область згортка переходить у добуток спектрів, а логарифм цього добутку - кепстр - у суму вихідної функції та апаратної функції приладу. У цьому випадку підвищується точність сигналу, що аналізується, особливо тоді, коли необхідне порівняння взаємних характеристик двох сигналів.

#### § 5.3.4. Інтерферометричні аналізатори динаміки різання

Підвищення точності контролю якості процесу лезової обробки, наприклад, при свердлінні, гострінні, фрезеруванні повинне забезпечуватися шляхом визначення моменту руйнування, защемлення різального інструмента в заготовки, що оброблюються.

Пристрій для керування процесом різання [5.43] дозволяє підвищити точність формоутворення поверхні деталі, що оброблюється, визначенням глибини деформованого шару матеріалу.

Керування здійснюється за параметрами формоутворення поверхні (довжині хвилі пружних деформацій, силі різання), визначенням спектральної щільності світлового сигналу на виході лазерної системи (рис. 5.16).

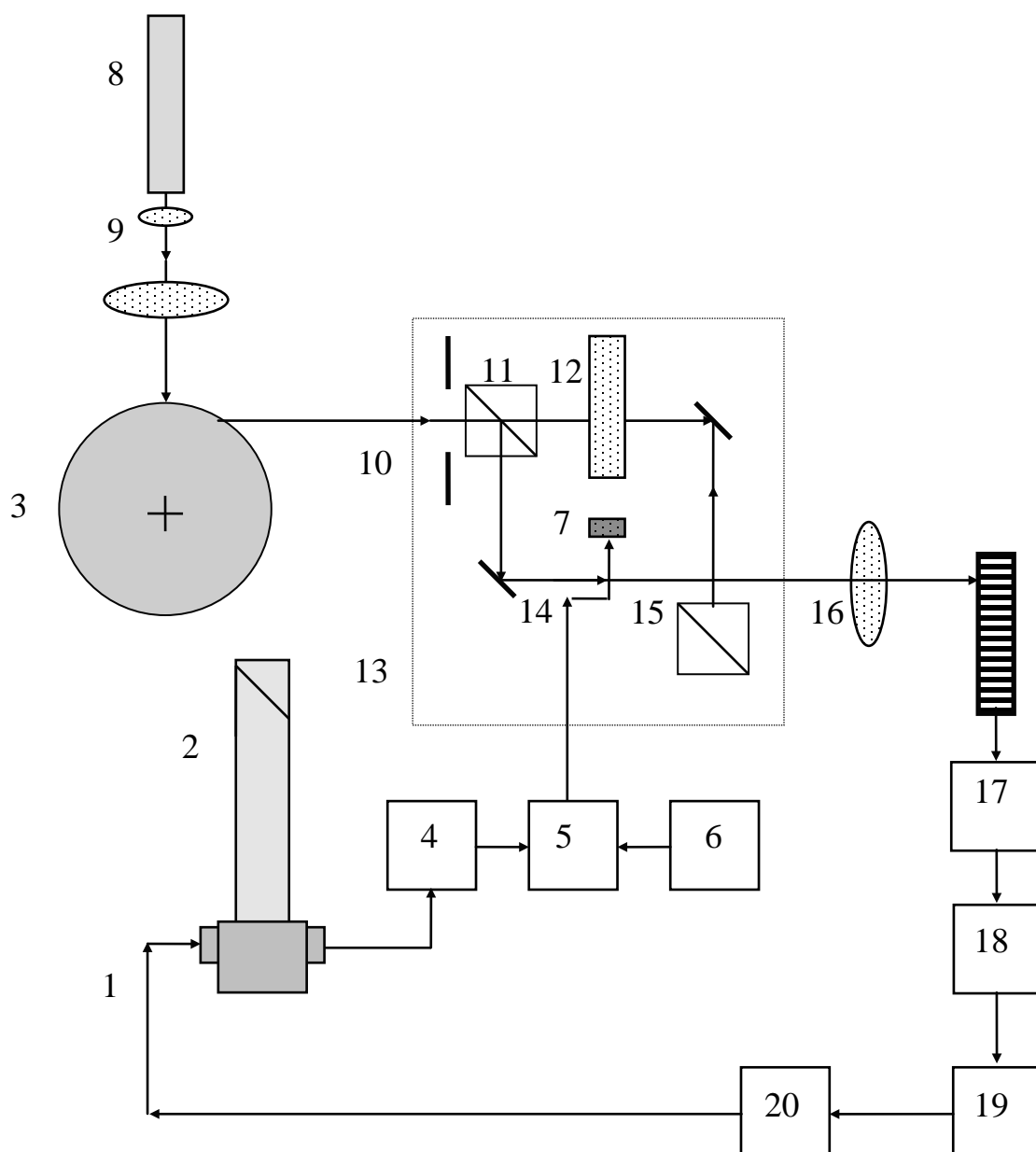


Рис. 5.16. Функціональна схема лазерного пристрою діагностики процесу різання: 1 - відчутник сили різання, 2 - ПІ, 3 - деталь, 4 - підсилювач, 5 - ЛЧМ-модулятор, 6 - генератор опорних сигналів, 7 - АОМ, 8 - лазер, 9 - телескопічна система Кеплера, 10 - діафрагма, 11,14 - світлоподілювач, 12,13 - дзеркала відбиття, 15 - Фур'є-об'єктив, 16 - блок фотореєстрації, 17 - АЦП, 18 - керуючий блок, 19 - ЦАП, 20 - виконавчий механізм верстата

Глибина деформованого шару оброблюваної поверхні обумовлена закономірностями розподілу напруг у зоні різання. Якщо напруги локалізовані в області, що прилягає до верхівки інструмента, глибина шару зменшується.

Зміна напруг у матеріалі зв'язана зі змінами сили різання, що впливають на варіації зміни глибини шару. Тому для формування поточного сигналу про зміни глибини шару необхідно визначати добуток сили різання і характеристики, що оцінюють локалізацію напруг у місці торкання верхівки різального інструмента і поверхні деталі. Такою характеристикою є довжина пружної хвилі, оскільки вона визначена дією напруг у заданому обсязі.

Для прямого виміру параметрів поверхневої хвилі освітлюють розширеним лазерним пучком випромінювання зону різання. Відбитий пучок, промодульований по фазі поверхневими хвилями, надходить у модифікований інтерферометр Маха-Цендера (рис. 5.16).

Схема пристрою містить відчутник сили різання, розташований на різальному інструменті, підключений через підсилювач і ЛЧМ-модулятор до електричного входу АОМ. Дифракційний АОМ здійснює операцію помноження розділення світлового потоку, що надходить в оптичну систему, параметри якого залежать від довжини пружної хвилі матеріалу, на коефіцієнт пропущення АОМ як функції величини сили різання. ЛЧМ-модулятор формує високочастотний сигнал, промодульований по частоті сигналом складової сили різання, що забезпечує стиск за часом на вході АОМ широкосмугового сигналу.

Обчислюючи величину глибини деформованого шару поверхні, що оброблюється можна визначати відхилення від номінальної величини для даних режимів обробки. Формування керуючих команд на зміну режимів роботи системи технологічного обладнання здійснює обчислювальний блок обробки відеосигналу оптичної системи пристрою [5.44]. При перевищенні припустимого рівня керуючий блок 18 формує команду на зміну режимів різання в ЦАП 19, що з'єднаний з виконавчими рушійми верстата.

Пристрій може мати обмеження в застосуванні в технологічному процесі, що властиво всім лазерним системам прямого виміру зносу, тобто залежність від частоти аналізованої поверхні. Отже, пристрій може застосовуватися тільки лише для чистових видів обробки без присутності МОТС. Крім того, наявність стружки і налипань також негативно можуть впливати на вірогідність роботи пристрою.

Інтерферометричний пристрій аналізує спектрально-кореляційні характеристики сигналів ВАЕ динамічних підсистем різального інструмента і оброблюваної заготовки одночасно [5.45]. Тому АОСА містить два пристрої для введення електричних сигналів в оптичну систему. У якості таких пристроїв використані дифракційні АОМ зі сферично увігнутими поверхнями для розширення АЧХ вхідного п'єзоелемента.

Оптична система АОСА (рис. 5.17) побудована за схемою модифікованого інтерферометра Маха-Цендера, а пристрій реєстрації вхідних електричних сигналів містить два канали, підключені до виходів вимірювальних п'єзовідчутників.

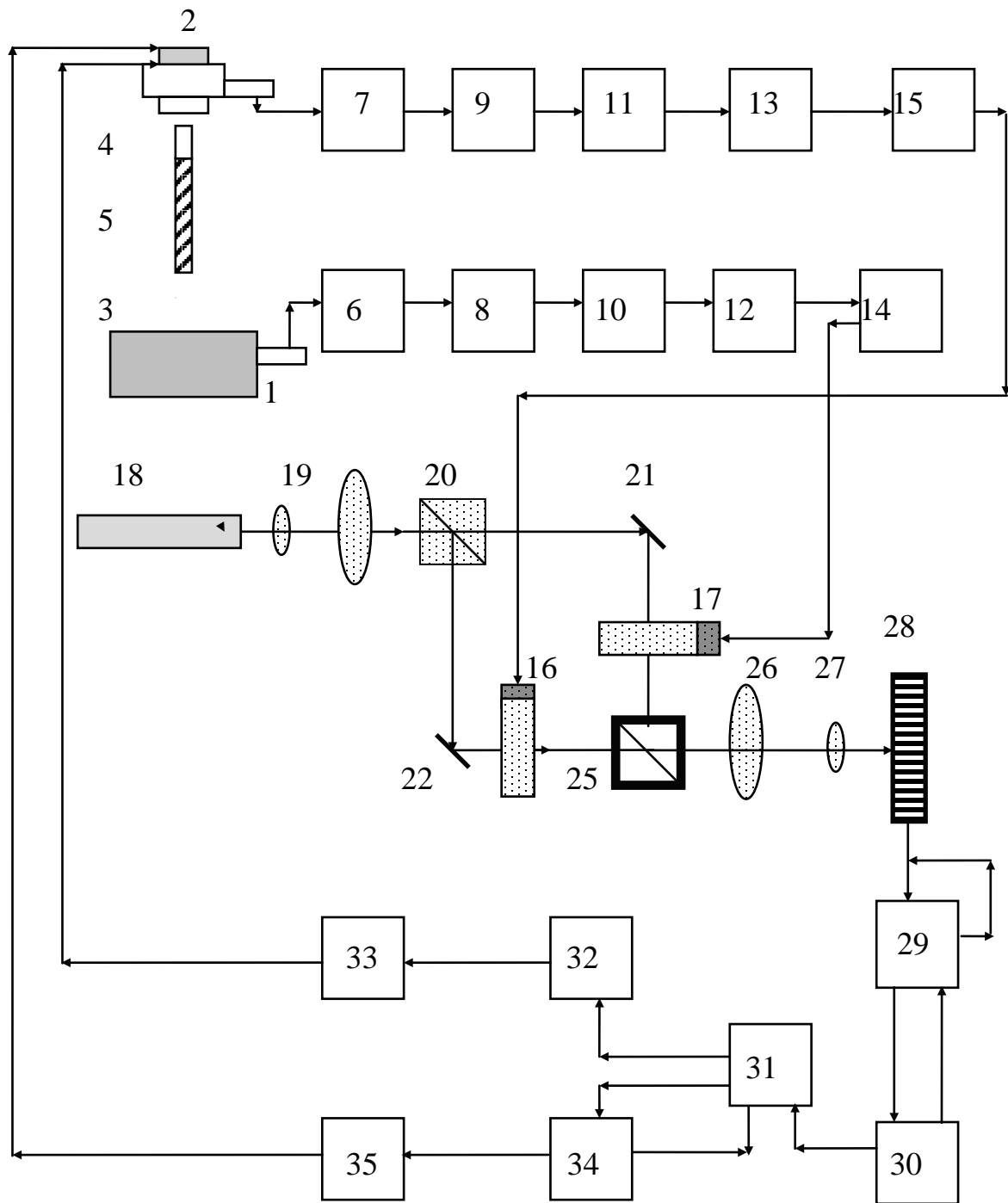


Рис. 5.17. Структурна схема лазерного пристрою контролю процесу: 1, 2 - відчувачи ВАЕ, 3 - оброблювана деталь, 4 - шпиндель, 5- РІ, 6,7 - попередні підсилювачі, 8,9 - блоки смугових фільтрів, 10,11 - перемикачі каналів, 12,13 - балансові модулятори, 14,15- підсилювачі потужності, 16,17 - АОМ, 18- лазер, 19- коліimator, 20, 25- світлоподілюючий куб, 21,22 - дзеркала, 23,24,26 - фур'є-об'єктиви, 27 - об'єktiv, 28 - фотоприйомний елемент, 29 - блок керування і живлення фотоприймача, 30 - АЦП, 31- РС АТ, 32,34 - ЦАП, 33, 35 - виконавчі механізми верстата



Відчутники встановлені на різальному інструменті та заготовці. Наприклад, при контролі якості обробки деталей свердлінням (або фрезеруванням) відчутник встановлюється в шпинделі із закріпленим у ньому інструментом. Виходи відчутників 1 і 2 підключені до входів каналів електронної системи реєстрації. Канал електронної системи містить попередній підсилювач, блок смугових фільтрів, з'єднаний з перемикачем каналів, модуль формування вхідних електричних сигналів для наступної його обробки в оптичній системі АОСА. Кожен перемикач складається з аналогового комутатора та двійкового лічильника. Вибір каналу обумовлюють кодом, що подають на вхід формувачів. Код забезпечує двійковий лічильник, три виходи якого підключені до аналогового комутатора. Модулі формування вхідних сигналів представляють собою балансовий модулятор, що необхідний для операції перетворення та узгодження частотних характеристик досліджуваних сигналів та відчутників оптичної системи обробки сигналів. Вихідне балансно-модульоване коливання в кожному каналі підсилюється за потужністю і подається на електричні входи дифракційних АОМ на бігучих хвилях, які встановлені в плечах інтерферометра.

Вхідний світлоподілюючий куб інтерферометра розщеплює падаючий на нього світловий пучок випромінювання лазера, що проходить через телескопічну систему Кеплера, на два пучки, що ортогонально розповсюджуються у просторі. На виході інтерферометра встановлений світлоподілювальний куб з фотохромним покриттям граней. Обидва пучки направляють відбивними дзеркалами через АОМ на Фур'є-об'єктиви, що їх перетворюють.

Розподілення амплітуд і фаз світлових полів у дифракційних зображеннях світлових сигналів на виході являють собою залежність від параметрів балансно-модульованих сигналів  $U_{12}(t)$  і  $U_{13}(t)$  відповідно  $U_1(f_y, f_z, t)$   $U_2(f_y, f_z, t)$ . Розподіл  $U(f_y, f_z, t)$  описано виразом

$$U(f_y, f_z, t) = F \left\{ A_o e^{-j\omega_o t} \cdot \tau(x, y) * T(x, y, U_m(y)) \right\}, \quad (5.56)$$

де  $f_z, f_y$  - просторові частоти двовимірного зображення фазомодульованого світлового сигналу,

$A_o, \omega$  - амплітуда і частота хвилі світлового пучка, що надходить до інтерферометру,

$\tau(z, y)$  - функція пропущення апертури оптичної системи АОСА,

$T(x, y, U_m(t))$  - комплексний коефіцієнт пропущення АОМ,

$z, y$  - координати в предметній площині оптичної системи,

$U_m(t)$  - вхідний електричний сигнал.

На виході інтерферометра встановлений світлоподілюючий куб з фотохромним покриттям. Коефіцієнт пропущення вхідної грані куба виконаний по логарифмічному закону, а вихідної грані – по антилогарифмічному. На вхідних гранях куба сформовані енергетичні спектри

сигналів  $W_I(f_y, f_z, t)$ . У світлоподілюючому кубі оптична система АОСА утворюється різниця логарифмів амплітуд світлових хвиль у потоках обох плечей інтерферометра:

$$W(f_z, f_y, t) = U(f_z, f_y, t) \cdot U^*(f_z, f_y, t). \quad (5.57)$$

При цьому на вихідній грані куба здійснена операція експонування залежності (3.2).

Отже, на виході оптичної системи інтерферометра інтенсивність світлового потоку дорівнює відношенню інтенсивностей світлових полів, що характеризують параметри сигналів ВАЕ деталі та різального інструмента і відображають стан плинного процесу обробки.

Далі світловий сигнал надходить через Фур'є-об'єктив та масштабуючий об'єктив на світлочутливі елементи блоку фотореєстрації, що розташований у вихідній площині зображень оптичної системи. У площині формується автокореляційна функція  $R(f_y, f_z, t)$ , що може бути описана виразом:

$$R(f_z, f_y, t) = \iiint_0 W_2(f_z, f_y, t) \cdot \exp[j2\pi(f_z z + f_y y)] dz dy d\tau. \quad (5.58)$$

Зміни функції  $R(f_y, f_z, t)$  характеризують динаміку різання, стан інструмента і деталі в процесі різання (защемлення свердла, досягнення критичного зносу) і є інформацією для формування керуючих команд системою ТЕ.

Блок фотореєстрації, виконаний, наприклад, на основі ПЗЗ-приймача зображень, складається з лінійного або матричного ПЗЗ-елемента, блоку керування і живлення. Вихідний сигнал блоку фотореєстрації надходить через АЦП та модулю узгодження до обчислювального пристрою, виходи якого підключені до виконавчих механізмів металообробного верстата.

Лазерний пристрій дозволяє з високою точністю визначати передаварійну ситуацію, що виникає в процесі різання. При защемленні різального інструмента у заготовці утворюється єдина динамічна система "інструмент-заготовка", що має свій власний частотний спектр, щільність якого відрізняється від спектральної щільності кожної підсистеми інструмента, що досліджується, та деталі.

Автокореляційна функція  $R(f_y, f_z, t)$  являє собою  $\delta$ -образний імпульс на виході когерентної оптичної системи інтерферометра.

Досліджуючи різницю між значеннями еталонної автокореляційної функції та плинним її значенням, можна визначити момент защемлення і виконати корекцію режимів різання. Збільшення значення різниці свідчить про підвищення зносу інструмента.

Досягнення критичного зносу визначається обчислювальним пристроєм, і відпрацьовуються команди на зміну різального інструмента дозволяє підвищувати достовірність контролю якості процесу механообробки в умовах автоматизованого виробництва.

#### **§ 5.4. Інтегрований аналізатор віброакустичних і електромагнетних сигналів різання**

Якість процесів токарної обробки матеріалів визначається параметрами формоутворення та шорсткості поверхні деталі. Здебільшого погіршення параметрів технологічного процесу обробки супроводжується руйнуванням або критичним зносом робочої частини різального інструмента (РІ), зацімленням інструмента у заготовці, тощо. Уникнути критичного або граничного зносу РІ можливо, наприклад, якщо враховувати характеристики оброблювальності матеріалу заготовки та шляхом зміни РІ раніш закінчення періоду стійкості. Однак це не виключає виникнення аварійних ситуацій, котрі призводять до порушення якості технологічного процесу. Як визначалося раніше, підвищення надійності роботи системи може забезпечуватися сумісною реєстрацією та обробкою сигналів динаміки різання, тобто віброакустичної емісії (BAE) та електрорушійної сили (ЕРС) різання, що підвищує достовірність контролю та керування технологічним обладнанням (ТО). Граничний стан процесу механообробки, до якого відносяться руйнація, критичний знос різальної частини інструмента, зацімлення РІ в заготовці, характеризуються різними типами сигналу BAE. Завдяки аналізу сигналів BAE, що генеруються в зоні різання, можливо контролювати межу зносу інструмента і запобігання погіршенню якості поверхні деталі, фіксувати момент руйнування інструмента та формувати команди для виконуючих органів металорізального верстата з CNC-системою керування. Найбільш важливою проблемою є прогнозування стану розвитку надзвичайних ситуацій з РІ та якістю деталі.

Когерентний оптико-електронний пристрій АОСА [5.46] містить первинний відчутник сигналів BAE, у якості якого використовується широкосмуговий п'єзовідчутник, може бути використаний відчутник пасивного контролю ЕРС різання на основі поясу Роговського.

Оптична система пристрою (рис. 5.18) містить дифракційний АОМ для введення електричних сигналів в оптичну систему обробки Фур'є-зображень, світлоподілювальний елемент. Схемні рішення пристрою дозволяють знизити нестабільності потужності джерела випромінювання і температурного дрейфу схемних елементів, розширення смуги пропущення частот досліджуваного сигналу.

Світловий пучок випромінювання лазера 1 розщіплюється на два пучки, ортогонально направлених один до одного. Перший пучок коліматором 3 розширюють до розмірів світлового вхідного вікна АОМ 4. Фур'є-образ вхідного електричного сигналу формується в задній площині фур'є-об'єктива 5 та масштабується об'єктивом 6 для підвищення розділення дифракційних екстремумів.

Перший фотоприймальний блок 7 на основі ПЗЗ-приймача зображень реєструє дифракційні максимуми, що характеризують амплітудно-частотний

спектр сигналу ВАЕ, причому непродифрагований потік  $I_o$  світлового випромінювання відфільтровують, використовуючи ніж Фур'є.

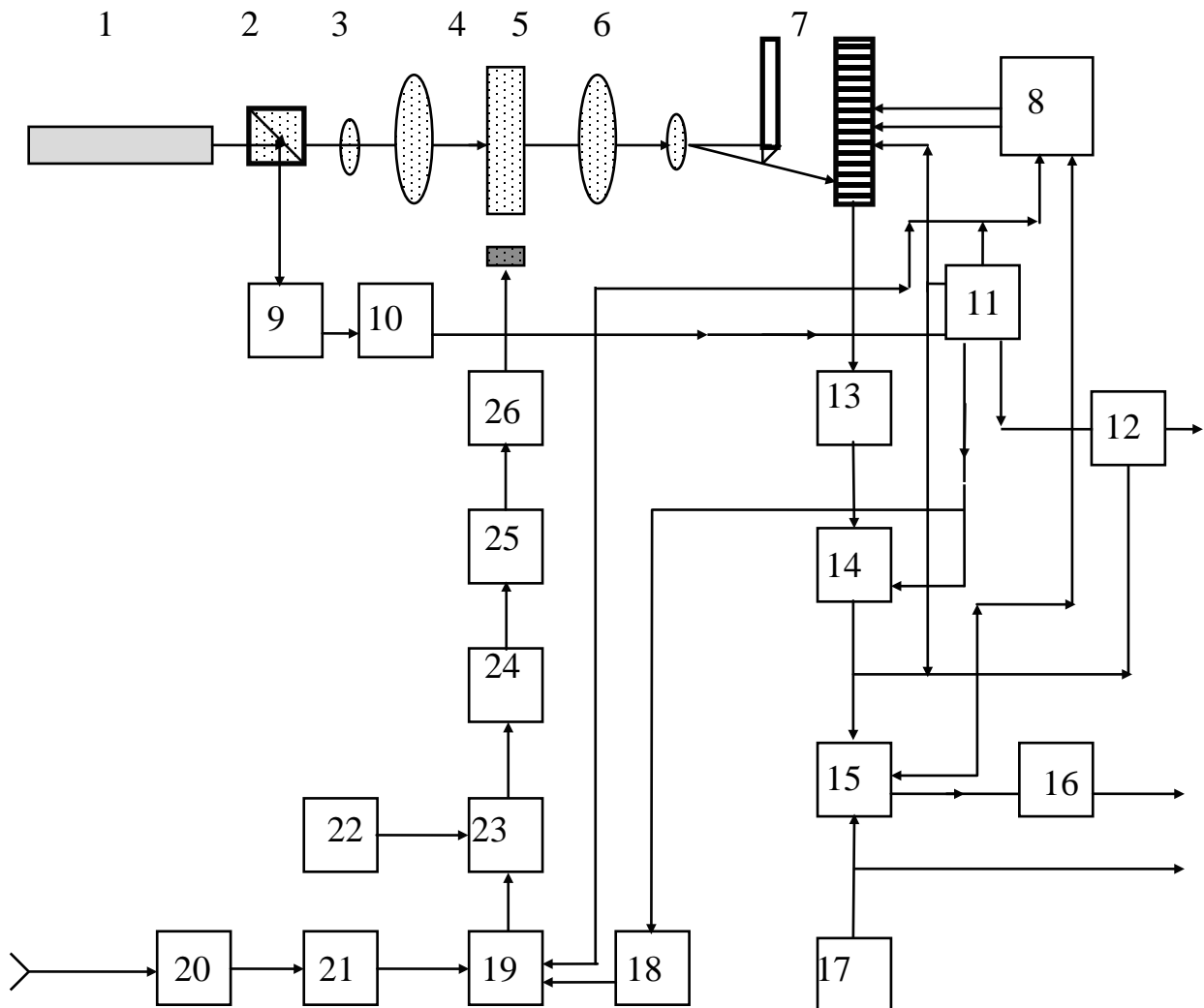


Рис. 5.18. Схема лазерного аналізатора динамічних сигналів: 1 - лазер, 2 - світлоподілюючий елемент, 3 - коліматор, 4 - АОМ, 5 - Фур'є-об'єктив, 6-об'єктив, 7,9 - блок фотореєстрації, 8 - термостабілізуючий блок, 10- стабілізатор напруги, 11 - генератор розгортки, 12 - індикатор аналогових сигналів, 13 - буферний підсилювач, 14,16 - АЦП, 15 - ключ, 17 - блок попередньої установки коду, 18 - генератор каліброваних сигналів, 19 - комутатор, 20 - первинний відчутник сигналу, 21, 25 - попередній підсилювач, 22 - генератор опорної напруги, 23 - балансовий модулятор, 24 - апроксимуючий блок, 26 - підсилювач потужності

Другий пучок світлового випромінювання від світлоподілюючого елемента надходить на площадку фоточутливого блоку 9, вихідна напруга якого надходить на вхід стабілізатора 10 напруги, а вихідний сигнал вносить корекцію рівня напруги генератора 11 розгорнення. Якщо рівень вихідного сигналу фотоприйомного блоку 9 зростає на деяку величину, стабілізатор 10 зменшує напругу на таку ж величину на виході генератора 11 розгорнення для підтримки стабільної характеристики фотоприйомного блоку 7. Таким чином, вплив часової нестабільності потужності випромінювання на зміну загального рівня сигналу, що реєструє, на виході оптичної системи аналізатора виключено.

Вихідний сигнал ПЗЗ-приймача через буферний підсилювач 13 надходить на вхід першого АЦП 14, де перетворюється в цифровий код. Перший фотоприйомний блок 7 механічно сполучений з термостабілізуючим блоком 8, на виході якого надходять сигнали від генератора 11 розгортки і від кодового виходу першого ключа 15, на який надходить сигнал від блоку 17 попередньої установки коду. Цей сигнал другим АЦП 16 перетворюють у цифровий код, а потім подають на цифровий вихід системи для сполучення з обчислювальним пристроєм обробки сигналу. Другим виходом системи для сполучення з обчислювальним пристроєм є кодовий вихід блоку 17 попередньої установки коду. На вході термостабілізуючого блоку 8 (рис. 5.19) встановлений другий ключ 27, що здійснює переключення блоків 28 і 29 вибірки і збереження з блоку 17 попередньої установки коду. Вихідні сигнали блоків 28 і 29 підсумовують суматором 31 і підсилюють по потужності підсилювачем 32. Цикли запис-стирання сигналів здійснює формувач 30.

Термодвигун 33, на який надходить сигнал від другого підсилювача 32 потужності, сполучений із ПЗЗ-приймачем. Таким чином, корекцію положення чутливих елементів ПЗЗ-приймача здійснюють по температурному дрейфу системи.

Досліджуваний сигнал від відчутника 20, встановленого на РІ поблизу зони обробки, надходить через підсилювач 21 на вхід комутатора 19. Комутатор здійснює переключення сигналу ВАЕ і сигналу, що надходить від генератора каліброваних сигналів постійної частоти  $f_0$ , що реєструє перший фотоприймальний блок 7 у вигляді максимуму енергетичного спектра оптичного сигналу. Це підвищує точність роботи аналізатора спектра. Крім того, на комутатор 19 надходить сигнал від генератора розгорнення, з'єднаного з термостабілізуючим блоком для корекції положення ПЗЗ-приймача щодо площини зображення, що реєструється. Вихідний сигнал від комутатора надходить на балансовий модулятор.

Опорний сигнал надходить від генератора опорної напруги. Апроксимуючий блок 24, на який надходить БМ коливання, вирівнює характеристику системи реєстрації досліджуваного сигналу для того, щоб реєструвати високочастотну область з достатнім коефіцієнтом підсилення. Це

обумовлено тим, що при реєстрації сигналів ВАЕ, у процесі обробки деталей різанням з ростом частоти спостерігається зниження рівня амплітуди спектральних компонентів.

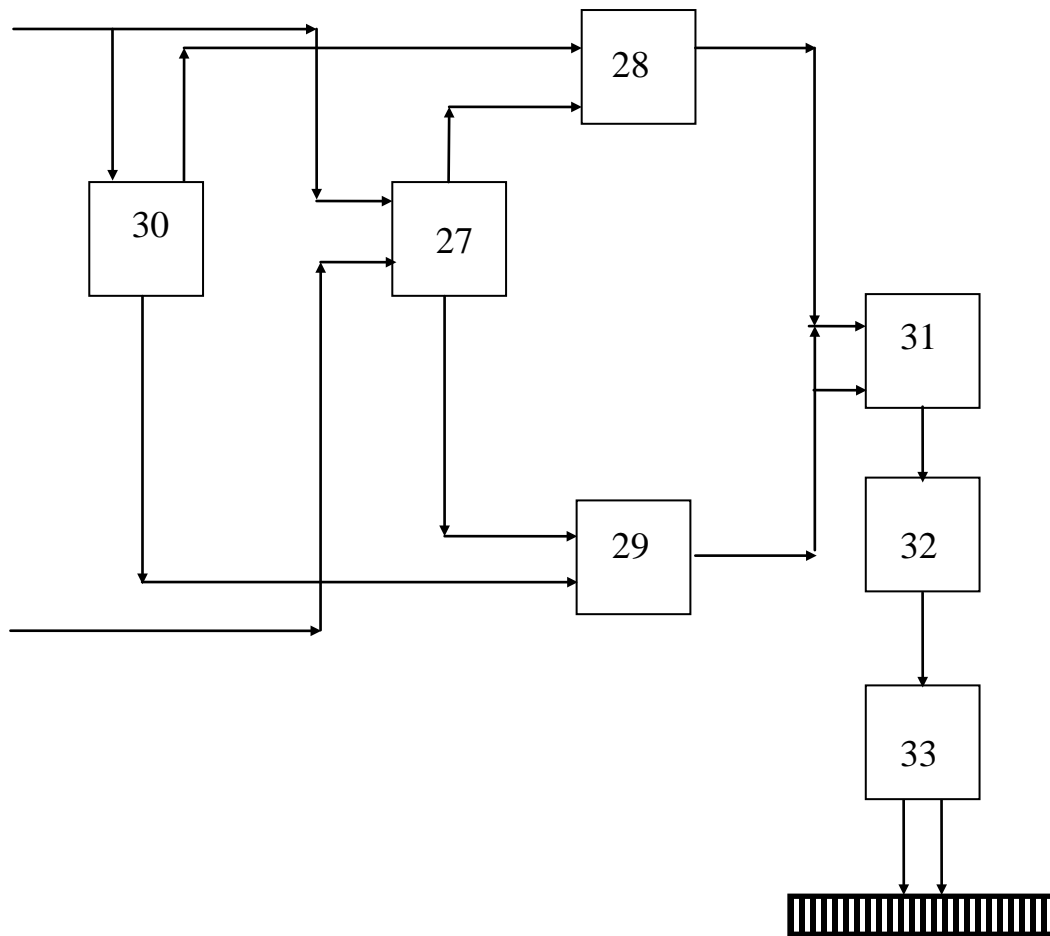


Рис. 5.19. Структурна схема термоелектронного блоку: 27 - електронний ключ, 28, 29 - блоки вибірки і збереження, 30 - формувач циклів, 31 - суматор, 32 - підсилювач потужності, 33 - термодвигун

Апроксимований сигнал підсилюють по напрузі другим попереднім підсилювачем 25 для одержання більш високого коефіцієнта підсилення потужності, що необхідно для керування п'єзовідчувником АОМ 4.

Перший підсилювач 26 потужності формує БМ сигнал, що надходить на сферично увігнутий п'єзовідчувник АОМ 4, причому один електрод його секціонований. Сферично увігнута поверхня п'єзовідчувника дозволяє коректувати АЧХ п'єзовідчувника у бік розширення смуги пропускання частот. Отже, підвищення точності обробки оптичних зображень спектральних складових сигналів досягається схемними рішеннями електронного каналу реєстрації вхідного електричного сигналу, що дозволяють стабілізувати

положення фотоприймальних елементів у вихідній площині оптичної системи, скорегувати діапазон досліджуваного сигналу, щоб не допустити втрати інформації і погіршення якості контролю і діагностики стану процесу різання.

Математичні моделі, що визначають засади дії подібного лазерного АО аналізатора динамічних сигналів плинного стану системи ТО в наближенні стаціонарності випадкових процесів, базуються на аналізі спектральних складових здійснюється в режимі реального часу. Тому ці системи найбільш вигідні для здійснення контролю динамічних процесів. Це зумовлено тим, що на тлі достатньо повільного часу механічного процесу різання здійснюється реєстрація окремих реалізацій надшвидкого електричного нестационарного випадкового сигналу. Вікно часу реєстрації обумовлено часом реалізації алгоритму миттєвого спектру Фур'є, що є необхідним при визначенні параметрів високочастотних сигналів ВАЕ.

Вираз для енергетичного спектру в інтервалі часу  $T$  (тривалості реєстрації динамічного сигналу) уявляє усереднену по ансамблю реалізацій на фіксованій частоті:

$$W(f_y, f_z, t) = \mu[U(f_z, f_y, t) \cdot U^*(f_z, f_y, t)], \quad (5.59)$$

де  $\mu$  - математичний оператор усереднення,

$U(f_y, f_z, t)$  - розподіл амплітуд і фаз поля монохроматичної плоскої світлової хвилі,

$f_y, f_z$  - просторові частоти дифракційного зображення по координатам  $x, y$ .

Автокореляційну функцію світлового сигналу визначено:

$$R(f_y, f_z, t) = \mu[\xi(y, z, t) \cdot \xi^*(y, z, t)], \quad (5.60)$$

де  $\xi(y, z, t) = A^0 e^{-j\omega_c t} \cdot r(z, y) T_{AOM}(z, t)$ ,

$A^0$  - амплітуда вхідної світлової хвилі,

$T_{AOM}(z, t)$  - функція пропускання АОМ,

$r(z, y)$  - функція вхідної апертури оптичної системи.

Оскільки спектрально-кореляційні характеристики залежать від густини розподілу ймовірностей параметрів сигналу  $x(t)$  на інформативному вході системи, необхідно провести усереднення за відповідним розподілом  $p_{x_m}(x_m), p_{\Omega_m}(\Omega_m), p_{\varphi_m}(\varphi_m)$ .

Тоді в узагальненому виді енергетичний спектр світлового сигналу:

$$W(f_y, f_z, t) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \mu[U(f_y, f_z, t) \cdot U^*(f_y, f_z, t)] \cdot p_{x_m}(x_m) p_{\Omega_m}(\Omega_m) p_{\varphi_m}(\varphi_m) dx_m d\Omega_m d\varphi_m. \quad (5.61)$$

Можливо також помітити, що кореляційна функція у порівнянні з змінами миттєвого спектру динамічного сигналу є функцією, що повільно змінюється.

Тому приймаємо її за постійну для стадії визначених розмірів затуплення різальної частини інструмента. Кореляційну функцію доцільно враховувати при визначенні зносу після проходження достатньо тривалих інтервалів часу у порівнянні з тривалістю реалізації світлового сигналу. Тривалість часових інтервалів визначена, виходячи з параметрів оброблювальності матеріалів у системі "інструмент-заготовка".

По-перше, визначимо параметри плинного енергетичного спектра для нового (або гострого) РІ та з фіксованою ступінню зноса по задній грані різальної частини, котра привносить змінення в статистичні характеристики динамічних сигналів та густину розподілу параметрів. Врахувавши розподіл амплітуд  $x_m$  сигналу  $x(t)$ , що досліджується у виразі (5.61), одержимо [5.47]:

$$W(f_z, f_y, t) = \mu \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} U(f_z, f_y, t) \cdot U^*(f_z, f_y, t) \cdot \frac{x_m}{\sigma} e^{-\frac{x_m^2}{2\sigma^2}} dx_m, \quad (5.62)$$

де  $\sigma$  - середнє квадратичне відхилення амплітуди сигналу  $x(t)$ .

Змінюючи межі інтегрування виразу миттєвого спектру, зробимо припущення, що амплітуда сигналу змінюється в межах  $[-X_m, +X_m]$ .  $|x_m|$  - граничний рівень, що визначає розміри зносу різальної частини. Якщо величина енергетичного спектру перевищує допустиме значення, аналізатор реєструє перевищення межі зносу  $h$  РІ.

Для визначення плинного енергетичного спектру використаємо вираз для кутового спектру світлового сигналу  $\xi(y, z, t)$  при АМ-сигналі.

Тоді математичний вираз для енергетичного спектра затупленого РІ:

$$\begin{aligned} W(f_z, f_y, t) &= \mu [W_i^m(f_z, f_y, t)] = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \int_{-X_m}^{X_m} W'(f_z, f_y, t) \frac{x_m}{\sigma} e^{-\frac{x_m^2}{2\sigma^2}} dx_m = \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{1}{N\sigma^2} W'(f_z, f_y, t) \int_{-X_m}^{X_m} x_m e^{-\frac{x_m^2}{2\sigma^2}} dx_m, \end{aligned} \quad (5.63)$$

де  $W'(f_z, f_y, t)$  - апаратна функція АО спектроаналізатора з прямокутною апертурою  $A_z A_y$ .

Після перетворень отримаємо вираз, що відтворює енергетичний плинний спектр динамічного сигналу ВАЕ на стадії приробки РІ:

$$W_1^{\text{dim}}(f_z, f_y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{X_m^2}{4\sigma^2} [1 - e^{-\frac{X_m^2}{2\sigma^2}}] \cdot W'(f_z, f_y, t). \quad (5.64)$$

Згідно тієї ж методики є можливість знайти значення енергетичного спектра з сегментарним усередненням для зношеної різальної частини РІ з



урахуванням розподілу густини ймовірності  $p_{x_m}(x_m)$ , що відповідає цим умовам та режимам різання, використовуючи табличні інтеграли [5.36]:

$$W_2^{\text{dim}}(f_z, f_y, t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{4}{\alpha^4} X_m^4 e^{\frac{(X_m^4 - 2\sigma^2 \alpha^2)}{4\sigma^4}} [e^{\frac{X_m^4}{2\sigma^4}} - 1] \cdot I_3\left(\frac{X_m \alpha}{\sigma^2}\right) \cdot W'(f_z, f_y, t), \quad (5.65)$$

де  $\alpha$  - перший статистичний момент розподілу,

$I_3$  - модифікована функція Бесселя третього порядку.

Амплітуда розподілу світлового поля в площині спектрального аналізу системи аналізатора визначена геометричними параметрами дифракційного АОМ, характеристиками оптичної системи лазерного аналізатора, а також статистичними середніми величинами процесу, що досліджується. Зі збільшенням дисперсії розподілу густини ймовірності амплітуди сигналу (при решті незмінних параметрів) пік інтенсивності відеосигналу в першому дифракційному максимумі повинен змінюватися зі збільшенням ширини максимуму та зменшенням амплітуди. Це вказує на збільшення поверхні контакту різальної частини РІ та поверхні заготовки, що оброблюється. Збільшення амплітуди сигналу ВАЕ, що означає зростання зносу РІ, призводить до зростання інтенсивності в дифракційному максимумі.

Флуктуації механічних та геометричних параметрів плівок окислів на поверхнях пари різання призводить до зміни величини праці виходу електронів, що призводить до виникнення електричного потенціалу на поверхнях контактуючих об'єктів. Коливання потенціалів являють собою імпульсні високочастотні сигнали, параметри котрих визначаються процесами тертя контактуючої мікрогеометрії поверхонь. Такі сигнали виникають при замиканні електричного ланцюгу, складеного з системи ТО, РІ та деталі, при торканні верхівкою інструмента поверхні заготовки. Сигнал містить постійну та змінну складові. На розмір та характер сигналу впливають фізико-хімічні та механічні характеристики контактуючих матеріалів, оскільки параметри сигналу визначаються мікрогеометрією оброблюваної поверхні на основі явищ, супроводжуваних процесом тертя. При цьому існує кореляція поміж якістю оброблюваної поверхні та параметрами реєструемого сигналу.

Змінна складова сигналу ЕРС найбільш чутлива до зносу РІ (рис. 5.20), оскільки вона характеризує енергетичні коливання на контактуючих поверхнях технологічного ланцюга, які знаходяться у стані тертя. Флуктуації змінної складової залежать від фізико-хімічних та механічних характеристик контактуючих матеріалів, вібрацій системи ТО, швидкості різання, контактної площі тертя "інструмент-деталь", стану поверхонь тертя. Постійна складова сигналу ЕРС різання більш чутлива до силових та термічних взаємодій у зоні різання.

На підставі аналізу досліджень складових сигналу ЕРС різання, є можливість зробити висновок про те, що найбільш доцільно реєструвати змінну складову сигналу ЕРС різання з наступним її аналізом. Реєстрація

сигналів виконується за допомогою трансформаторного чутника на базі пояса Роговського, що не потребує ізоляції деталі або РІ від системи ТО. АЧХ такого первинного перетворювача забезпечує реєстрацію змінних сигналів у широкому інтервалі частот (від 45 до 125 кГц), а також у позарезонансній зоні з високою чутливістю по вхідному рівню (від  $0,1 \div 5$  мВ/мкА) (рис. 5.21).

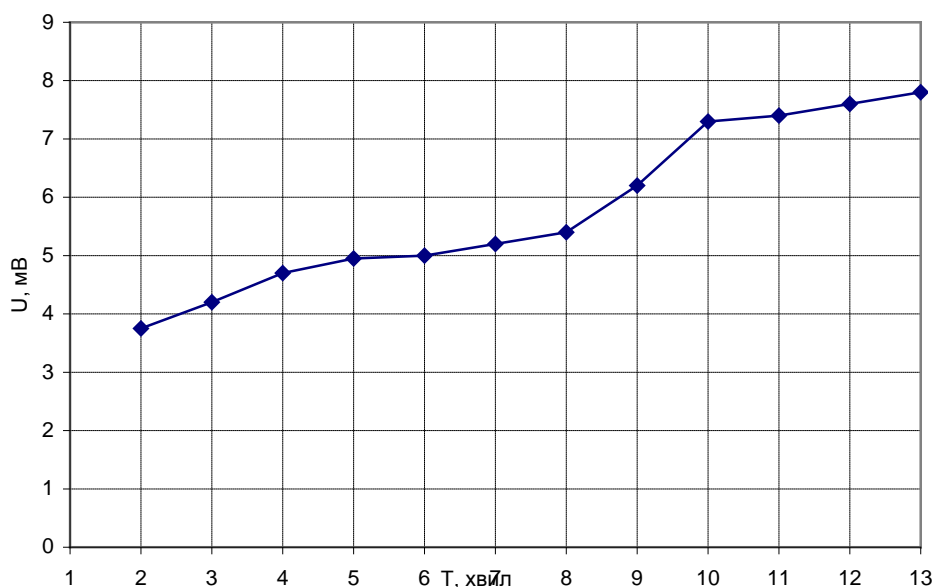


Рис. 5.20. Залежність змінення ЕРС різання від часу роботи РІ

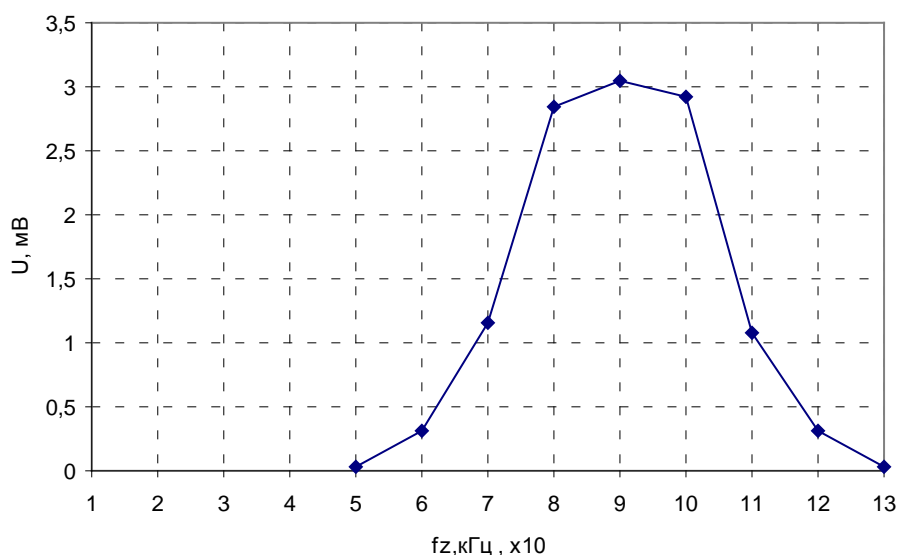


Рис. 5.21. АЧХ індукційного відчутника ЕРС різання

Отже, випадковий сигнал, визначаючий ЕРС різання, можливо задати як

$$\xi(t) = \sum_{n=1}^N \left[ \sum_{m=1}^M A_m + a_m \cos(\Omega_m t + \varphi_m) \right]_n, \quad (5.66)$$

де  $N$  - кількість реалізацій,

$M$  - кількість мод в  $n$ -й реалізації,

$\Omega_m$  - частоти мод в  $n$ -й реалізації,

$\varphi_m$  - фази моди,

$A_m$  - постійні складові сигналу ЕРС різання,

$\sum_{m=1}^M a_m \cos(\Omega_m t + \varphi_m)$  - змінна складова процесу,

$a_m, \Omega_m, \varphi_m$  - амплітуда, частота та фаза  $m$ -й моди сигналу.

$M$  є кількістю мод реалізації сигналу  $\xi(t)$  за інтервал реалізації процесу, що визначається тривалістю часового вікна  $T_{\text{АОМ}}$ .

Тоді для однієї реалізації отримаємо

$$\xi(t) = \sum_{m=1}^M A_m + a_m \cos(\Omega_m t + \varphi_m). \quad (5.67)$$

Експериментальні дослідження, проведені для процесів токарної та свердлільної обробки металів [5.48], довели, що інтегральні характеристики сигналу ЕРС різання дозволяють визначити зміну стану РІ: момент торкання РІ та заготовки, критичний знос та руйнування РІ (рис. 5.22). Критичний знос РІ характеризується збільшенням кількості реєструємих імпульсів сигналу і, відповідно, збільшення загальної інтенсивності сигналу. Викришування різальної частини інструмента визначається періодичними імпульсами. Руйнування інструмента визначається формуванням імпульсів малого періоду, що реєструється різким збільшенням потужності інтенсивності дифракційних максимумів оптичного зображення на виході системи.

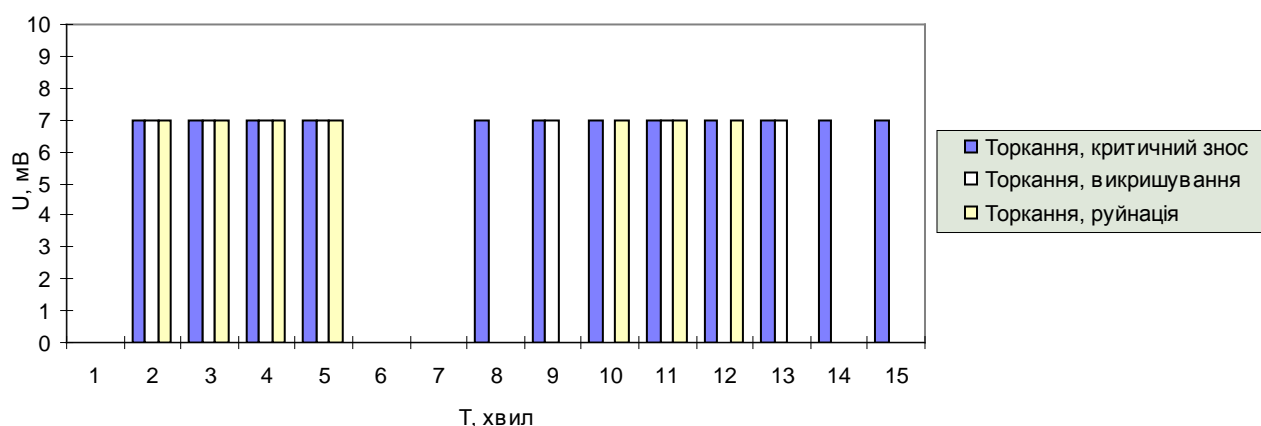


Рис. 5.22. Залежність імпульсних сигналів ЕРС при свердлінні від стану РІ

Важливим аспектом проблеми розробки аналізаторів якості технологічного процесу матеріалів є створення методів високопродуктивної обробки та техніки вимірювань. Одним з параметрів, котрий удосконалюється, є розрізняюча здатність оптичної системи. Більшість відомих оптичних та електронних методів пов'язано з складністю їх апаратурної реалізації. Тому є необхідність оптимізації характеристик оптичної системи, що базується на методах оптичних перетворень сумісно з електронними методами формування вхідних електричних сигналів.

Новий метод підвищення розрізняючої здатності лазерного аналізатора здійснюється шляхом застосування комбінованого метода дифференціювання Фур'є-образу вхідного сигналу з використанням балансної модуляції вхідного електричного сигналу. Дифференціювання здійснено при освітлюванні апертури дифракційного АОМ гаусовими пучками, поперечний розподіл інтенсивності котрих відповідає першій поперечній моді Гауса-Ерміта. Вибір першої моди обумовлений енергетичними характеристиками системи [3].

На підставі проведених досліджень та експериментів визначено основні методи для створення схем лазерних аналізаторів:

1. Реєстрація вібрацій рефлектиметричним методом з наступною обробкою амплітудно-фазо-частотного розподілу світлових полів в вихідній площині системи (для токарної обробки);
2. Формування та аналіз комплексного енергетичного спектру сигналів ВАЕ та ЕРС різання при різних типах механообробки матеріалів;
3. Можливість керування парком CNC-верстатів шляхом створення багатоканальних АО систем спектрального та кореляційного аналізу;
4. Створення аналізаторів на основі модифікованого інтерферометра Маха-Цендера дозволяє контролювати зацімлення РІ в процесі свердління, кінцевого фрезерування на підставі контролю сумісних спектральних характеристик сигналів вібрацій динамічних підсистем РІ та деталі.

Враховуючи розроблені принципи створення контрольно-вимірювальних пристроїв на базі лазерної АО техніки, виконано експериментальний зразок ДПС-3.ОЭ лазерного АО аналізатора стану граничного стану РІ при механічній обробці на токарних верстатах (табл. 5.1). В основі створення експериментального зразку АО аналізатора стану токарної обробки використано схему пристрою, що заснована на розробленому комбінованому методі підвищення розділювальної здатності АО системи. Це підвищує ступінь вірогідності праці лазерної системи автоматизованого аналізатора в приладобудівної та машинобудівної промисловості.

Перевірка працездатності нового аналізатора здійснювалася шляхом проведення попередніх випробувань на стійкість РІ на токарному CNC-верстаті, визначенням ймовірності параметрів випадкового сигналу вібрацій.

Гістограми розподілу відносної густини ймовірності доводять збільшення дисперсії в залежності від розміру зносу РІ (рис. 5.23, 5.24).

Табл. 5.1. Технічні характеристики лазерного контролера якості технологічного процесу ДПС-3.ОЭ:

Параметри	Величина
Амплітуда вхідного сигналу, мВ, $U_{вх}$	10
Вхідний опір, Ом	75
Частотна смуга пропускання БМУ $\Delta f_{и}$ , кГц	від 0,8 до 1200
Коефіцієнт підсилення по напрузі	10000
Потужність вихідних сигналів, Вт	1,0÷1,5
Вхідна напруга сигналу, мкА	20
Динамічний діапазон, дБ	60
Швидкодія, с	0,01
Температурний режим, не більш, °С	30÷35
Вібросталість, м/с <sup>2</sup> , не більш	200
Потужність живлення, мВт	120
Напруга живлення, В	220, 50 Гц
Габарити, мм	480 x 420 x 160

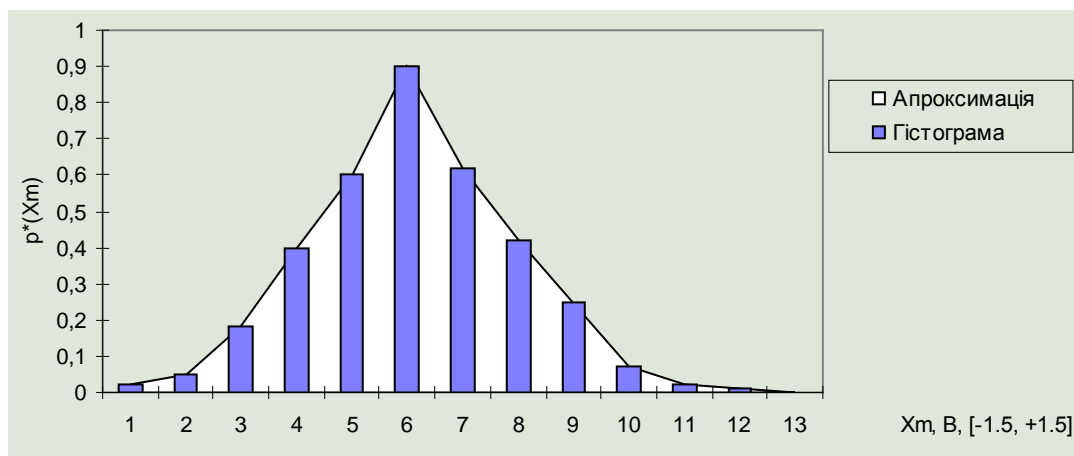


Рис. 5.23. Апроксимація узагальненої гістограми густини ймовірності амплітуд відеосигналу АОСА на стадії приробки РІ

Апроксимовані гістограми густини ймовірностей розподілу амплітуд сигналу, котрі співпадають з гістограммами, що створені в результаті статистичної обробки значень відеосигналу АО системи лазерного аналізатора. На підставі проведених досліджень розроблено алгоритми функціонування

лазерного аналізатора, які визначають плинний стан процесу механообробки на прикладі токарної обробки з урахуванням статистичних характеристик сигналів динаміки різання, що є перевагами в умовах гнучкого виробництва в порівнянні з відомими методами, коли діагностика проводиться по межовим значенням сигналів. Розроблені алгоритми функціонування аналізатора дозволяють визначити стадії стану РІ: приробка, стабільний знос, критичний знос, руйнування робочої частини, як показані у наступному параграфі.

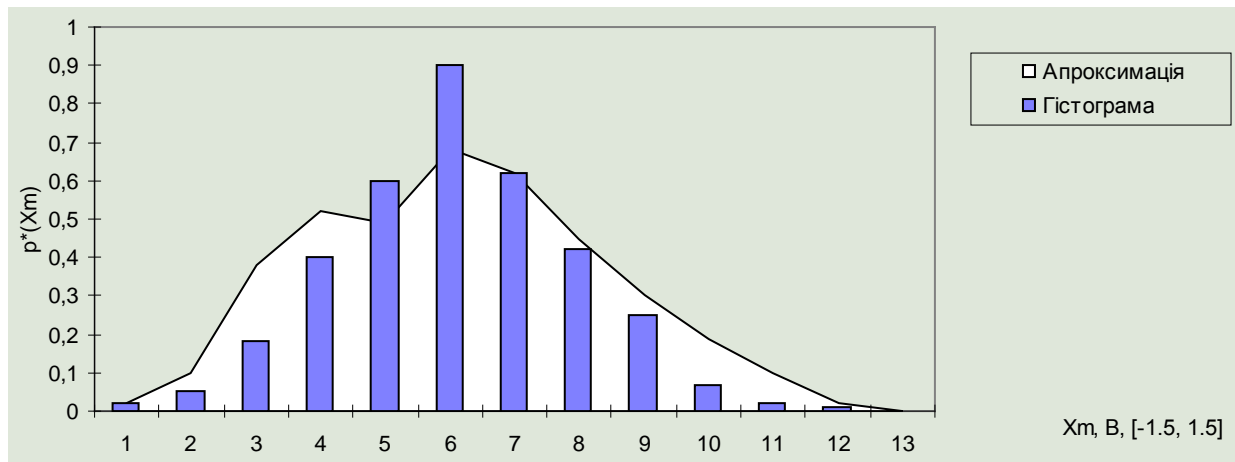


Рис. 5.24. Порівняльна характеристика густин ймовірностей відеосигналу АОСА на стадії зносу інструмента: 1 - стадія приробки РІ, 2 -  $h_3 = 0.1$  мм

Контроль технологічного процесу проводиться також не тільки по статистичним характеристикам динамічного процесу, але й по амплітудно-частотному розподілу спектра відеосигнала оптичної системи пристроїв. Це пов'язано з тим, що спектральна густина динамічних сигналів, що надходять від первинних чутників в систему лазерного аналізатора якості, розподілена в широкому частотному інтервалі. Розподіл частот залежить від стану плинного процесу, при цьому визначено поширення спектру для стану зносу різальної частини. Збільшується кількість складових спектру сигнала на виході оптичної системи аналізатора. При цьому амплітуди високочастотних складових зменшуються. Підвищення розміру різниці фіксує зниження амплітуд вищих складових спектра та наявність зносу різальної частини інструмента. Виконання програми завершується, виконується команда зупину верстата та заміна зруйнованого інструмента.

Отже, контроль якості плинного процесу механічної обробки здійснюється лазерним аналізатором в широкому діапазоні спектральної густини сигналів, що ідентифікують динаміку стану системи ТО. Це дозволяє

підвищувати якість продукції та автоматизувати процес контролю в гнучкому автоматизованому виробництві. Для створення систем контролю якості процесу механообробки перспективними є АО гібридні системи з цифровим постпроцесором, що дозволяє здійснювати багатопараметричну обробку сигналів динаміки процесу різання, здійснювати групове керування металообробними верстатами з ЧПК.

Оскільки відеосигнал в площині спектрального аналізу лазерного АО аналізатора має дифракційні максимуми світлового поля, що розташовані на відстанях, пропорційних частотам електричного вхідного сигналу. Амплітуди максимумів визначені розподілом густини ймовірності процесу, тобто статистичними середніми величинами, тому контроль процесу в низькочастотній області діапазону частот ВАЕ проводиться по першому дифракційному максимуму зображення. Збільшення зносу різальної частини інструмента визначає збільшення дисперсії випадкового процесу, що характеризує динамічні явища в ТО, при решті постійних параметрів системи ТО та лазерного контроллера.

Реєстрація ступеню зносу проводиться шляхом аналізу розподілу піків інтенсивності світлового потоку в першому дифракційному максимумі, що визначає збільшення площі контакту різальної частини РІ та поверхні оброблюємої заготовки. Збільшення амплітуди сигналів ВАЕ та ЕРС різання, яке визначає збільшення зносу РІ, призводить до зростання спектральної потужності сигналу інтенсивності в дифракційному максимумі зображення в діапазоні частот 20÷30 кГц, а також в близькому частотному інтервалі спектру.

Получені вирази аналізу статистичних характеристик світлового сигналу на виході оптичної системи спектроаналізатора можливо задати емпіричною узагальненою гістограмою густини ймовірності відеосигналу лазерного АО аналізатора, що реєструють на стадії приробки РІ (рис. 5.23). Зріст величини дисперсії амплітуд сигналу в процесі зносу різальної частини інструмента в зрівнянні з початком процесу обробки можливо ілюструвати графічною залежністю (рис.5.24).

Зрівняння отриманих гістограм з гістограмами, що є результатом математичного моделювання по амплітудному розподілу сигналів динаміки, дає співпадання результатів. Зміна високочастотних імпульсних складових сигналів динаміки залежно від стану РІ реєструються лазерним аналізатором по збільшенню ширини спектру та зміною величин амплітуд складових спектра. Визначення параметрів сигналів динаміки процесу різання за допомогою лазерного АО аналізатора дозволяє проводити багатопараметричну обробку в масштабі реального часу. Крім того, метод є універсальним та може застосовуватися для різних типів автоматизованого процесу механічної обробки: токарної, свердільної, фрезерної.

## **§ 5.5. Автоматизація контролю стану об'єктів технологічного процесу**

Контроль динаміки інженерії поверхні прецизійних деталей в приладобудуванні, в порошковій металургії для структурного аналізу пористих волоконних матеріалів та виробів на їх основі; діагностика мікроструктур є актуальною проблемою. Ця проблема вирішується створенням методів та систем обробки інформації, яка надходить від контролюємого об'єкту.

Запропоновано оптичноелектронний метод аналізу стану об'єкту, який забезпечує удосконалення технологічних процесів обробки матеріалів в умовах автоматизованого виробництва підвищення ефективності та забезпечення високої якості деталей шляхом реєстрації та обробки оптичних сигналів та зображень.

Системне впровадження забезпечено на основі оптично-електронного модулю, модулю АЦП та електронного модулю інтерфейсу узгодження з системою цифрової обробки відеосигналів оптичної системи на базі персонального комп'ютеру або програмованого контролера на базі однокристальної мікроЕОМ. Система забезпечує автоматичне вимірювання параметрів відеосигналу, який формує оптичний модуль, та містить відеокамеру на базі матричного ПЗЗ-приймача для реєстрації оптичної інформації, засоби узгодження з персональним комп'ютером (контролером) та програмні проблемно-орієнтовані засоби обробки сигналів. За методом, що пропонується, можна відслідковувати зміни формотворення поверхонь прецизійних деталей під час технологічної обробки, зміни форми різального леза РІ, тощо, тобто практично всі плинні процеси, які потребують діагностики.

Здійснено реєстрацію параметрів відеосигналу та подальший вибір елементів розподілення оптичного зображення, що контролюється. Подальшу обробку матричних елементів оптичного зображення (розподілу світлових полів) здійснено в програмному пакеті, що надає можливість відслідковувати плинний стан об'єкту під час прецизійної технологічної обробки матеріалів. Технологія аналізу інформації про стан технологічного процесу обробки матеріалів, що пропонується, визначає наявність, наприклад, зношення різальної частини інструмента, зміни параметрів формотворення поверхні прецизійної деталі.

Для аналізу стану технологічного процесу обробки матеріалів визначають наявність, наприклад, зношення різальної частини РІ, зміни параметрів формотворення поверхні прецизійної деталі. Реєстрація динамічного стану технічних об'єктів може здійснюватися завдяки створенню пакету програмного забезпечення функціонування обладнання [5.49, 5.50, 5.51]. Так було досліджено зміння стану різальної частини прохідного різця при токарній обробці вала Ст45 на прикладі задачі, що було вирішено [5.52].

Реєстрацію параметрів відеосигналу здійснено за допомогою відповідного програмного пакету. Надалі відеофайл розкладають по кадрах, наприклад, у стандартному пакеті Animation Shop. На рис. 5.25,а, рис. 5.26,а



наведено кадри файлів, на яких відслідковано зміну частот БМ сигналу акустичних коливань РІ 40 кГц, 180 кГц відповідно. Надалі здійснюють подальший вибір елементів розподілення оптичного зображення, що контролюють під час обраного часового інтервалу. Подальшу обробку матричних елементів оптичного зображення (розподілу світлових полів) здійснено в програмному пакеті MathCad 2000 Professional, що надає можливість відслідковувати плинний стан контролюємого об'єкту під час прецизійної технологічної обробки матеріалів (рис. 5.25,б, рис. 5.26,б). Так здійснено контроль розподілу світлових полів по координатах (Y, Z), що дає можливість досліджувати зміни параметрів розподілу залежно від плинного стану об'єкту. В даному випадку обрано координати (Y0, Z) – рис. 5.25,в, рис. 5.26,в, (Y, Z0) – рис. 5.25,г, рис. 5.26,г.

Надалі досліджується динаміка значення кожного з елементів сформованої матриці  $M_{k,j}$ , тобто координат (Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>). На рис. 5.25,в,г та рис. 5.26,в,г наочно наведено зміни розподілу оптичного сигналу залежно від динаміки параметрів під час обробки.

Отже, система автоматизованого контролю змінення АЧ розподілу світлових полів в розглянутому випадку наявно дозволяє діагностувати зношення РІ при зменшенні амплітуди та збільшенні частоти сигналу.

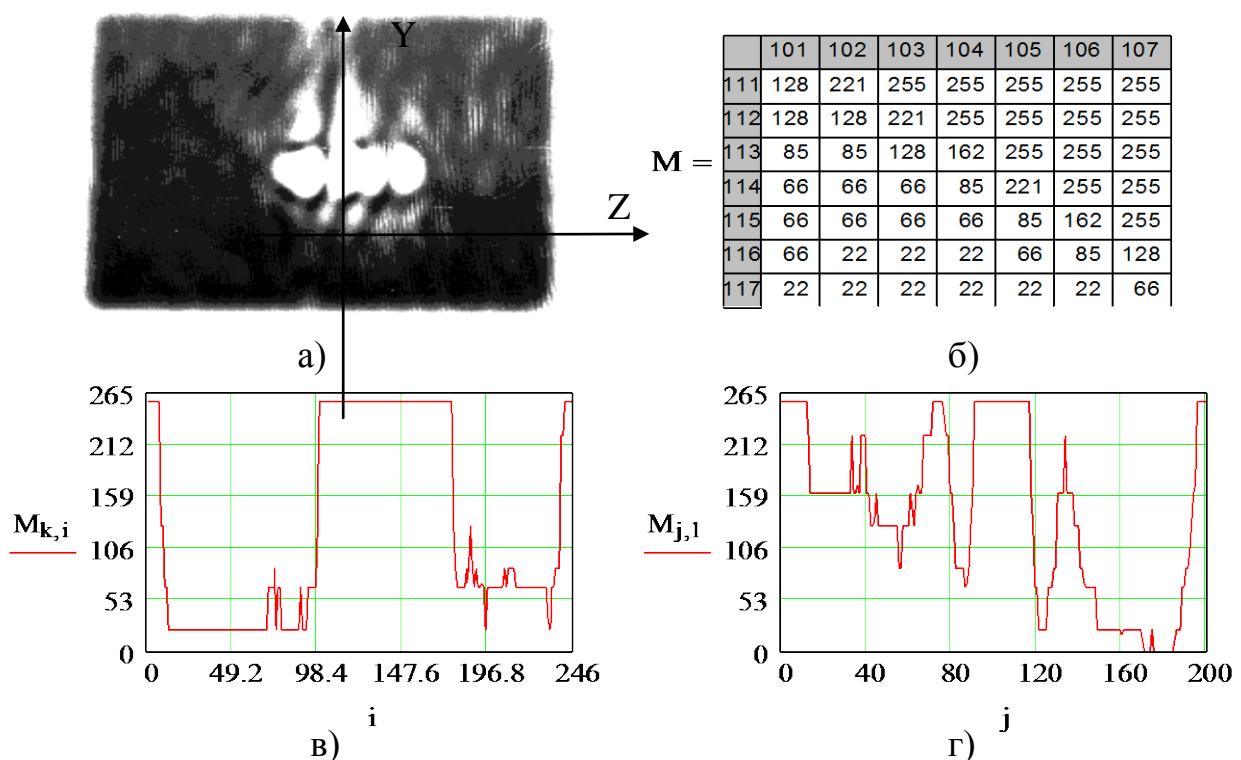


Рис. 5.25. Дослідження акустичного сигналу з частотою  $f_m = 40$  кГц: а) розподіл світлових полів у вихідній площині ОС; б) матриця значень відеосигналу; в) розподіл світлових полів по координатах (Y0, Z); г) розподіл світлових полів по координатах (Y, Z0)

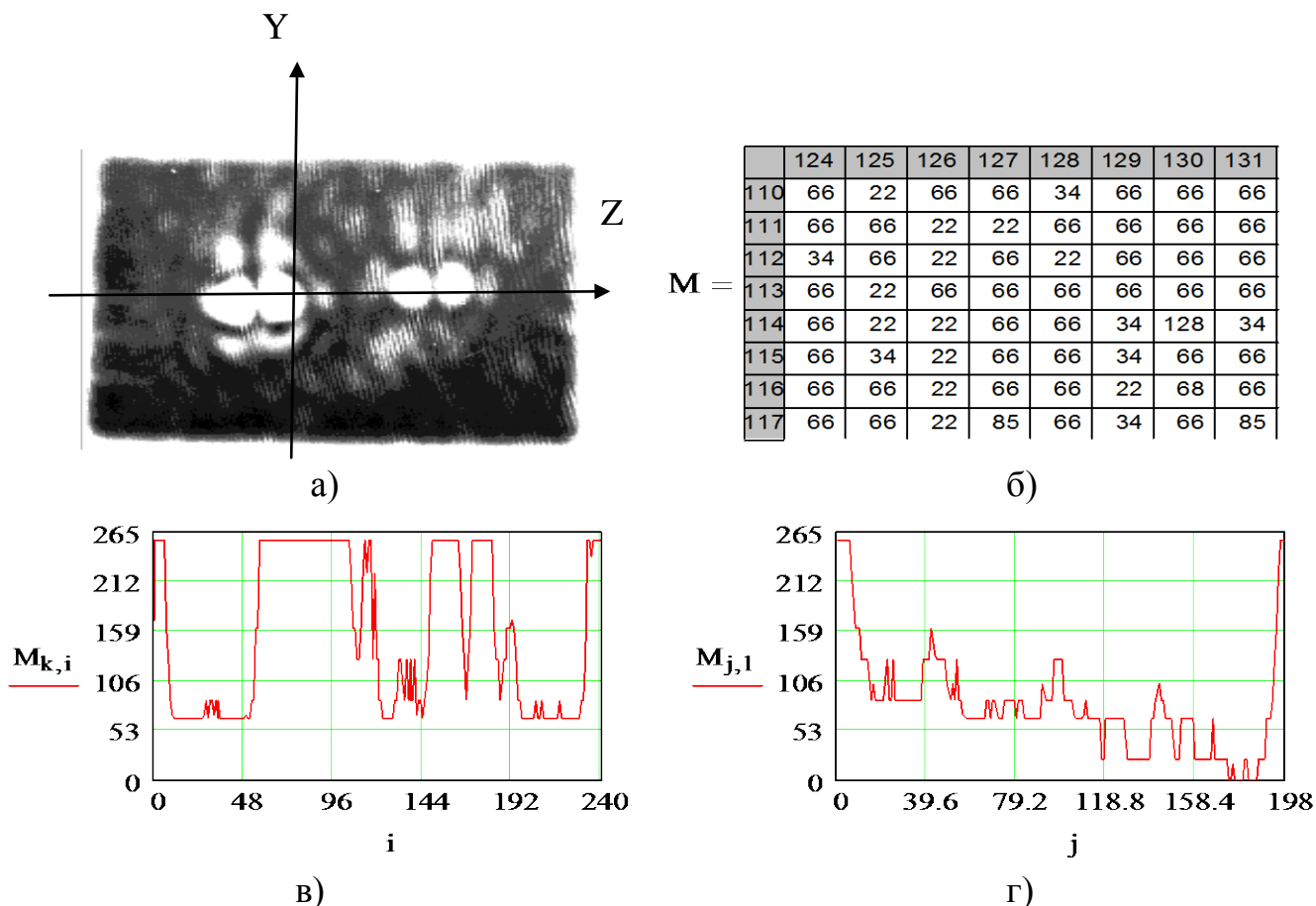


Рис. 5.26. Дослідження віброакустичного сигналу з частотою  $f_m = 180$  кГц: а) розподіл світлових полів в вихідній площині ОС; б) матриця значень відеосигналу; в) розподіл світлових полів по координатам (Y0, Z); г) розподіл світлових полів по координатам (Y, Z0)

Тому створення систем визначення параметрів акустичних коливань на підставі акустоелектронних систем, що здійснюють перетворення Фур'є, дають можливість аналізу процесу тонкого торкання акустичних, електромагнітних, світлових полів об'єктів технологічного процесу [5.53].

Створення швидкодіючих акустоелектронних та акустооптичних фур'є-процесорів з великою базою оброблюваних сигналів дозволяє реалізувати вискоєфективні алгоритми обчислення спектра аналогових сигналів і призведе до появи нового покоління пристроїв контролю та прогнозування плинного стану технологічних процесів механічної обробки надточних деталей.

Проведено авторські експериментальні дослідження щодо контролю токарної обробки приладом ДПС-3.ОЭ. Керування роботою лазерної системи контролю якості технологічного процесу здійснюється за результатами обробки відеосигналу АОСА, якій відповідає енергетичному спектру потужності  $W(f_z, t)$  світлового сигналу, що надходить на фотоприймальний блок ПЗЗ-

приймача зображень.

Керування роботою системи контролю якості ТП здійснюється по алгоритму, блок-схему якої наведено на рис. 5.27 [5.54].

На початку роботи обчислювального блоку системи контролю здійснюється обнулення вводимих величин відеосигналу, задається число  $i$  реєструючих елементів ПЗЗ-приймача зображень.

Далі відеосигнал  $I(N,t)$ , перетворений в блоку інтерфейсу АЦП в масив  $W$  даних, вводять в обчислювальний блок. Сигнал  $I_{0i}(N,t)$  характеризує розподіл спектральних характеристик оптичного сигналу АОСА до початку різання.  $I_{Ti}(N,t)$  характеризує розподіл спектральних характеристик оптичного сигналу АОСА з моменту включення подачі  $S_0$  верстата.

Апріорно вводять параметри оброблювальності матеріалів пари "інструмент-деталь": період стійкості інструмента  $T$ , значення подачі  $S_0$ , глибина різання  $t_p$ , швидкість різання  $V_p$ .

Вводяться параметри для розрахунку статистичних характеристик:  $N$  - обсяг вибірки,  $R$  - кількість розрядів. Початковий масив даних  $W_0$  визначає значення відеосигналу оптичної системи АОСА, що запомінався в якості контрольованого масиву. Масив  $W_1$  визначає параметри динаміки системи ТО на холостому ході верстата при включенні подачі верстата.

Виконання керуючих команд починається з визначення моменту торкання верхівкою різця поверхні заготовки, що оброблюється, і його початкової позиції, як крапки відліку положення РІ в період обробки (визначення нульової крапки).

Блок-схема алгоритму визначення моменту торкання наведена на рис. 5.28. Визначення здійснюють по апріорно введеному критерію торкання  $S_1$ . Торкання ідентифікується різким збільшенням амплітуди відеосигналу. Критерій  $S_1$  визначається, виходячи з обраблюємості матеріалів, а також виходячи з відношення значень  $S_{1i} = \frac{I_{Ti}}{I_{0i}}$  в  $i$ -х елементах ПЗЗ-приймача

зображень. Обчислюють значення масиву  $D=W_1/W_0$ , після цього порівнюють між собою плинні значення, задані кроком відліку таймера, і порівнюють з критерієм торкання. Якщо поточне значення не перевищує значення  $S_1$ , то знову здійснюється введення масиву даних відеосигналу. Якщо настає момент торкання, то підпрограма Р0 "Торкання" закінчується.

Далі слідує команда перемикання кроку відліку таймера  $\Delta t=0.1$  с. Виконується підпрограма Р1 "Приробка", блок-схема алгоритму якої наведено на рис. 5.29. Ступінь приробки РІ визначають за допомогою введеного заздалегідь апріорного критерію  $S_2$ . Закінчення приробки РІ означає стабілізацію різання, тому виконання підпрограми Р1 є значним етапом в процесі діагностики граничних станів процесу механообробки. Модифікація статистичних характеристик відеосигналу АОСА ідентифікує динаміку модифікації різального леза інструмента.

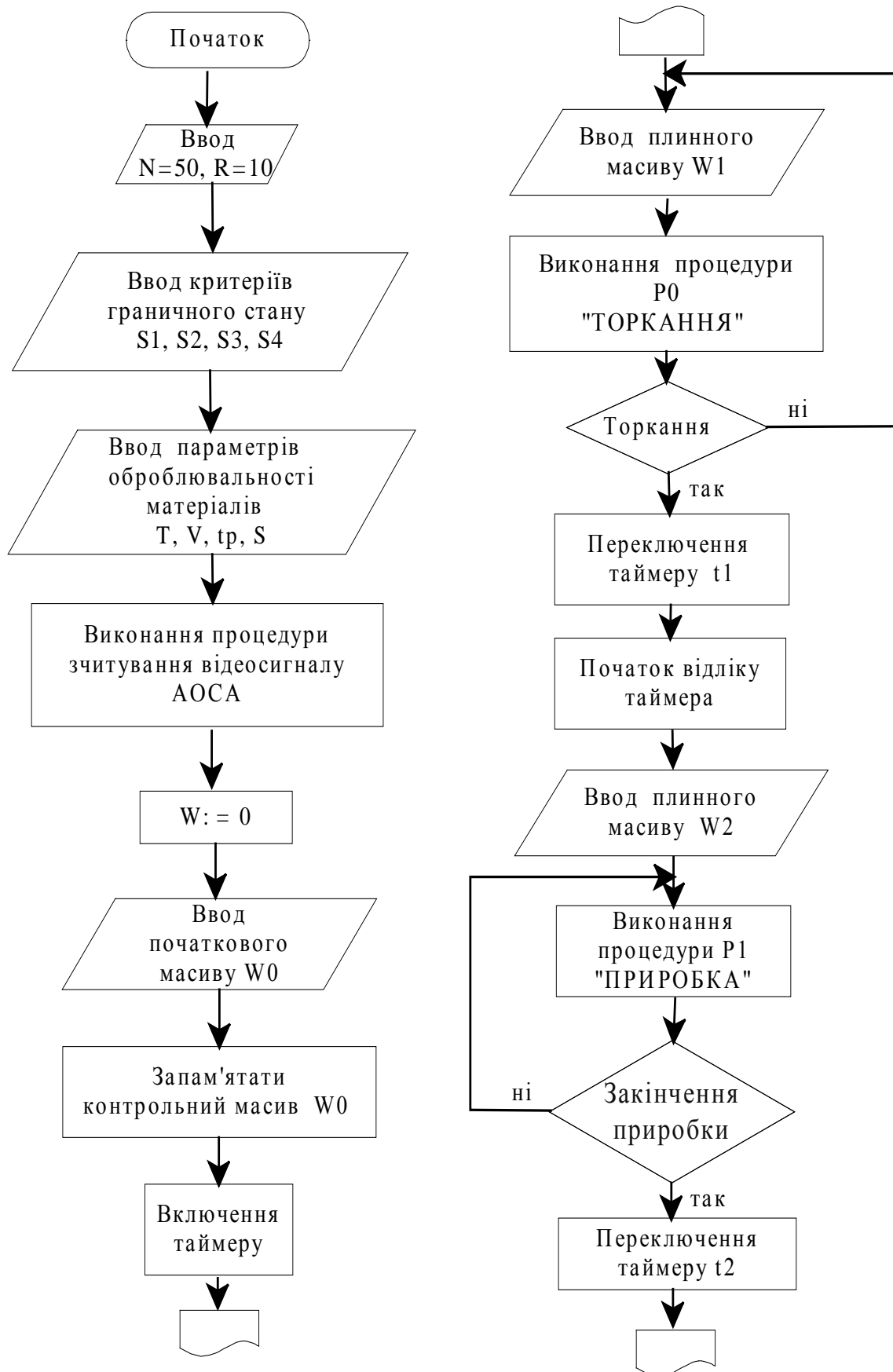


Рис. 5.27. Блок-схема алгоритму керування роботою лазерного АО аналізатора стану процесу механообробки (аркуш 1)

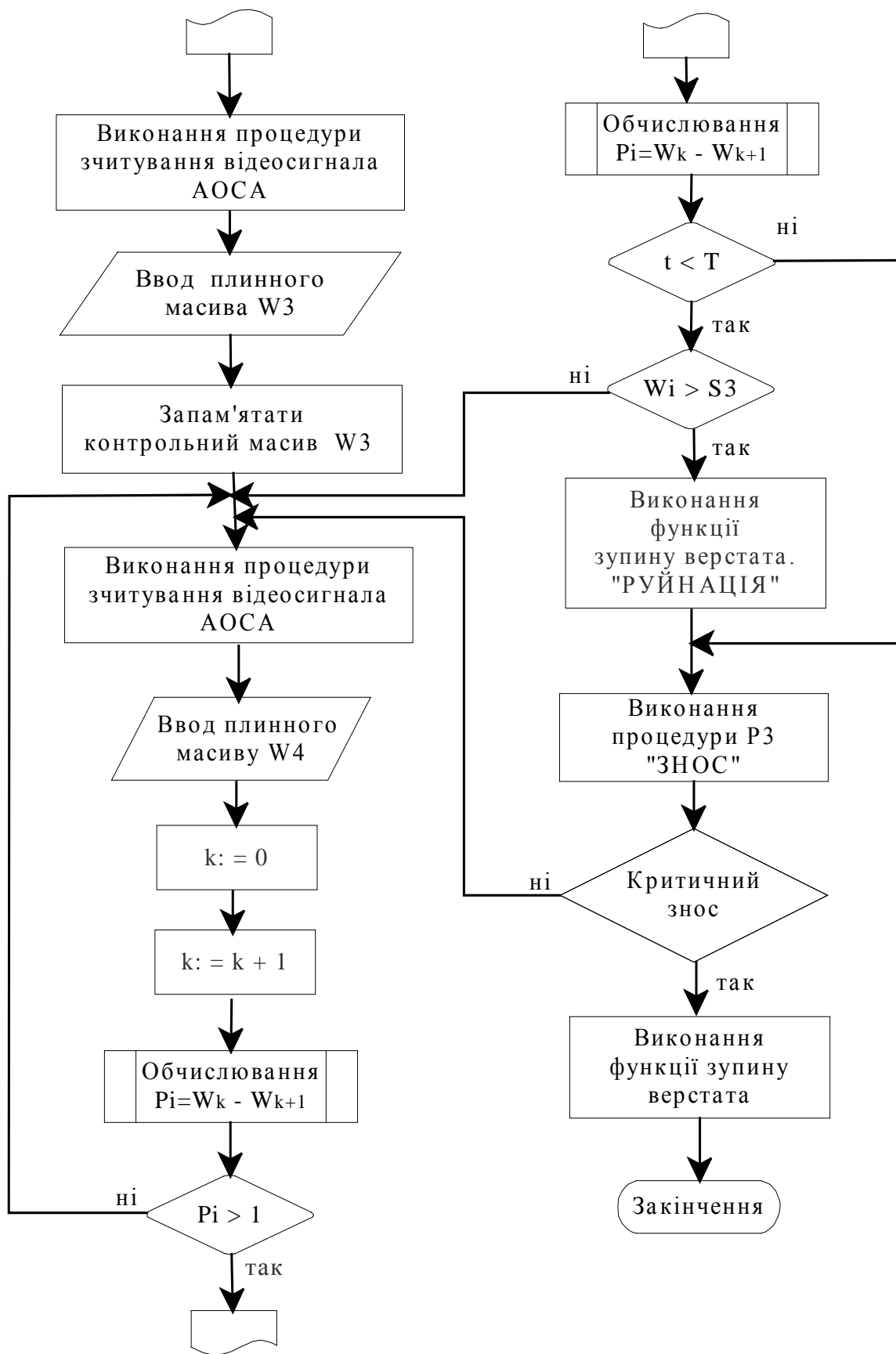


Рис. 5.27. Блок-схема алгоритму керування роботою лазерного АО аналізатора стану процесу механообробки (аркуш 2)

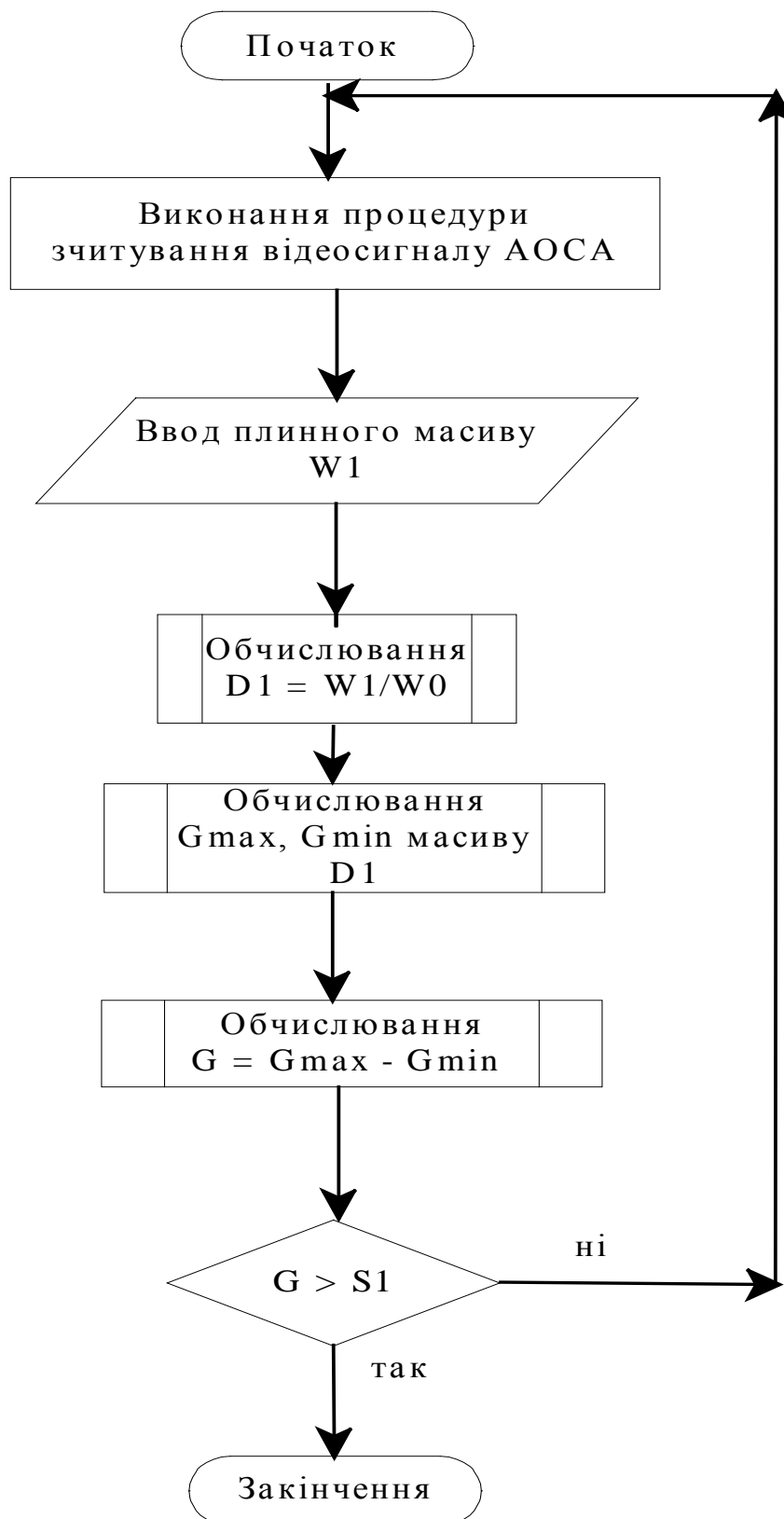


Рис. 5.28. Блок-схема алгоритму визначення лазерним АО аналізатором контролю моменту торкання PI з поверхнею оброблюємої деталі

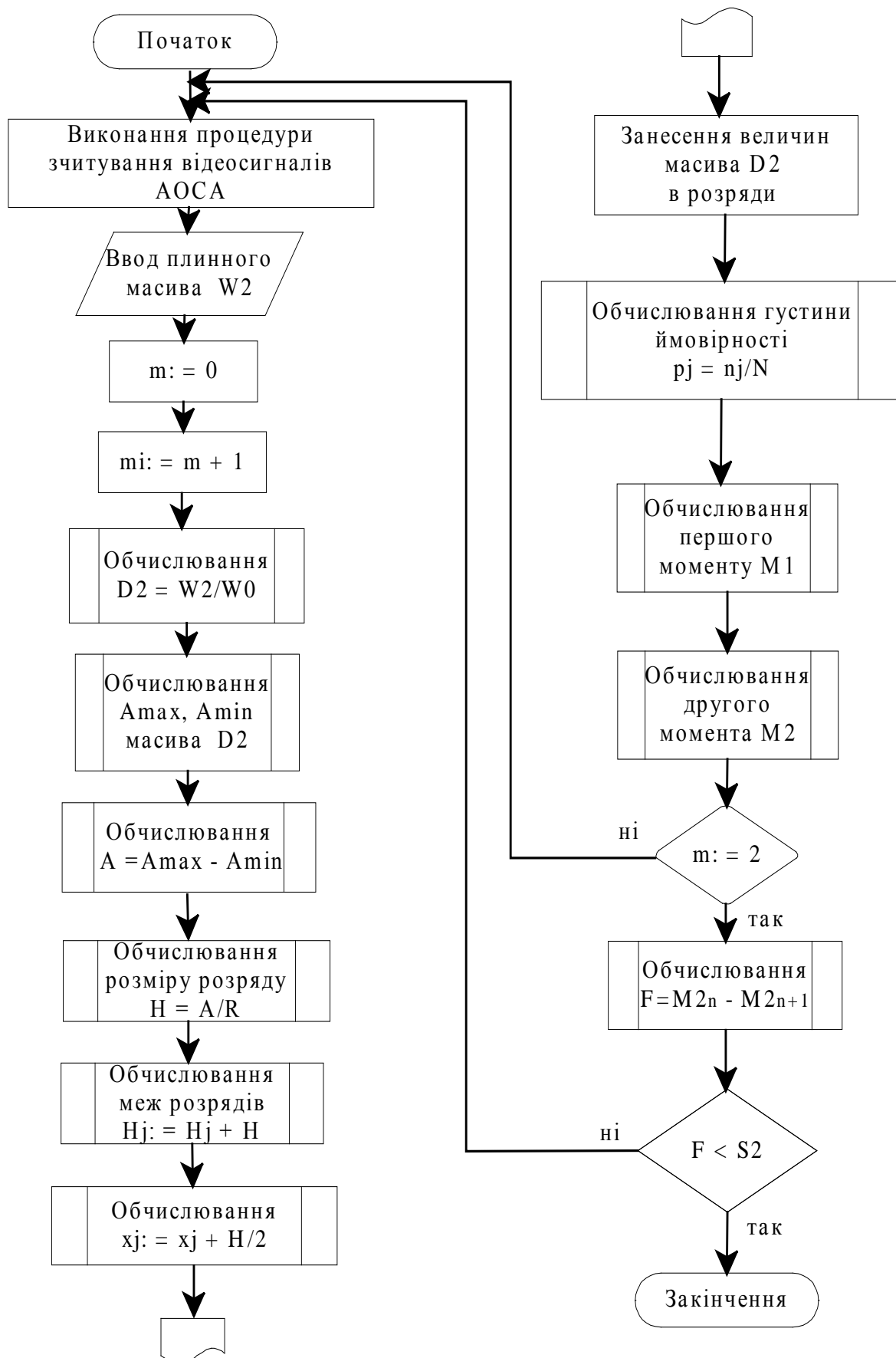


Рис. 5.29. Блок-схема алгоритму визначення закінчення приробки різального леза інструмента

Вводячи поточний масив W2 значень відеосигналу АОСА для винятку впливу нестабільностей випромінювання лазера, обчислюють поелементно відношення D2 масивів W2 і W0, а після цього межі масиву D2. По обчисленим значенням визначають розмір розряду  $H = \frac{A}{R}$ , середини розрядів

$$\tilde{x}_j := \tilde{x}_j + \frac{H}{2}.$$

Згідно ГОСТ 16429-70 під приробкою розуміється спроможність тертьових тіл в початковий період тертя поступово змінювати геометричні параметри і фізично-механічні властивості поверхневих шарів об'єктів таким чином, що при сталості зовнішніх умов супроводжується зменшення коефіцієнту тертя, інтенсивності зношування, роботи тертя еквівалентно теплу, що виділяється.

Аналогічне явище відбувається і при різанні, коли в період приробки РІ пристосовується до заданих умов, змінюючи свою геометрію завдяки інтенсивному зносу, набуває більш стабільну геометрію і структуру в відповідності з температурами, що виникають у контактних зонах по передній і задній різальних поверхнях. З формуванням стабільної геометрії та структури матеріалу різального клину настає процес рівномірного зношування. Це визначено лінійною ділянкою в стійкостній залежності для даного РІ.

Після цього для сигналу, що аналізується, здійснюють обчислення :

- щільності імовірності  $p_j^* = \frac{n_j}{N}$ ,
- центральних моментів розподілу:
- першого моменту (математичного сподівання)  $M1 = \sum_{j=1}^R p_j^* \cdot \tilde{x}_j$ ,
- другого моменту (дисперсії)  $M2 = \sum_{j=1}^R p_j^* \cdot (\tilde{x}_j - M1)^2$ .

Оскільки, як було доведено в попередніх розділах, дисперсія амплітуди та частот сигналу найбільш повно відбиває модифікацію якості плинного процесу обробки, і, зокрема, приробки, досягнення критичного зносу різального леза інструмента, подальший аналіз динамічних сигналів проводиться порівнянням плинних значень M2.

Здійснюється введення критерію S2, що відповідає полю допуску розкиду величин різниці дисперсій сигналу на наступній  $m$  і  $m-1$  ділянках часових інтервалів. Якщо  $M2_m - M2_{m+1} \leq F$ , то стан приробки інструмента ще не настав, і цикл введення та аналізу даних повторюється. Якщо  $M2_m - M2_{m+1} > F$ , то настав момент стабілізації дисперсії амплітуди сигналу ВАЕ, закінчення приробки інструмента, початку тривкого різання, а, отже, і якісній обробки поверхні заготовки.

Після закінчення підпрограми "Приробка" перемикається крок відліку таймера  $\Delta t = 1$  с. Вводять контрольний масив даних відеосигналу при закінченні



приробки W3 для подальшого аналізу параметрів сигналів системи ТО.

Під час періоду стабільного різання перевіряється періодичний стан плинного процесу динаміки різання. Це необхідно для можливого визначення аварійних ситуацій, що виникають в процесі технологічної обробки різанням. В цьому випадку вводиться критерій S3, що визначає параметр розподілу при руйнування РІ або його різального леза.

Здійснюється введення плинного масиву W4 з часовим інтервалом, заданим таймером, визначаються межі масиву. Якщо різність граничних значень масиву перевищує 1, збільшується загальний рівень сигналу. Отже, є можливість різкої модифікації стану РІ.

Далі слідує перевірка аварійної ситуації. Обчислюється відношення масивів плинного та контрольного. Надужиття відношенням критерію S3 фіксує виконання керуючої команди для останови металообладнання.

Далі, виходячи з характеристик оброблюємості, наприклад, з стійкісних залежностей даного РІ, визначають момент наступу критичного зносу різального леза інструмента. Для діагностики критичного зносу використаний також апарат визначення статистичних характеристик процесу динаміки. Реєстрація критичного зносу відповідає формуванню керуючої команди ТО на зміну пошкодженого РІ. Алгоритм визначення критичного зносу РІ наведений на рис. 5.30.

Контроль ТП проводиться також не тільки за статистичними характеристиками динамічного процесу, але й за параметрами амплітудно-частотного розподілу спектру відеосигналу оптичної системи аналізатора. Це зв'язано з тим, що, як було вказано вище в §§ 5.3, 5.4 спектральна щільність динамічних сигналів, що надходять з відповідних відчутників, розташованих на технологічному обладнанні, різальному інструменті тощо, на вхід системи лазерного аналізатора якості, є розподіленою в широкому частотному діапазоні.

Розподіл частот залежить від складових поточного процесу, при цьому спостерігається уширення спектру для стану зношеності різального леза. Зростає число складаючих спектру сигналу на виході оптичної системи аналізатора.

При цьому величини високочастотних амплітуд зменшуються. Тому алгоритм роботи аналізатора плинного процесу різання, блок-схема якого зображена на рис. 5.31, включає наступну послідовність дій.

Здійснюють обнулення масиву W. Виконується підпрограма лічення відеосигналу з елементів ПЗЗ-приймача системи. Запам'ятується контрольний масив W.

Далі з заданим кроком таймера вводиться плинний масив W1. Для винятку впливу нестабільностей випромінювання лазера обчислюється відносне значення  $Z = \frac{W1}{W0}$ . Обчислюється кількість значень отриманого

відношення для визначення кількості N спектральних, які складають відеосигнал, що визначає частотний розподіл спектру.

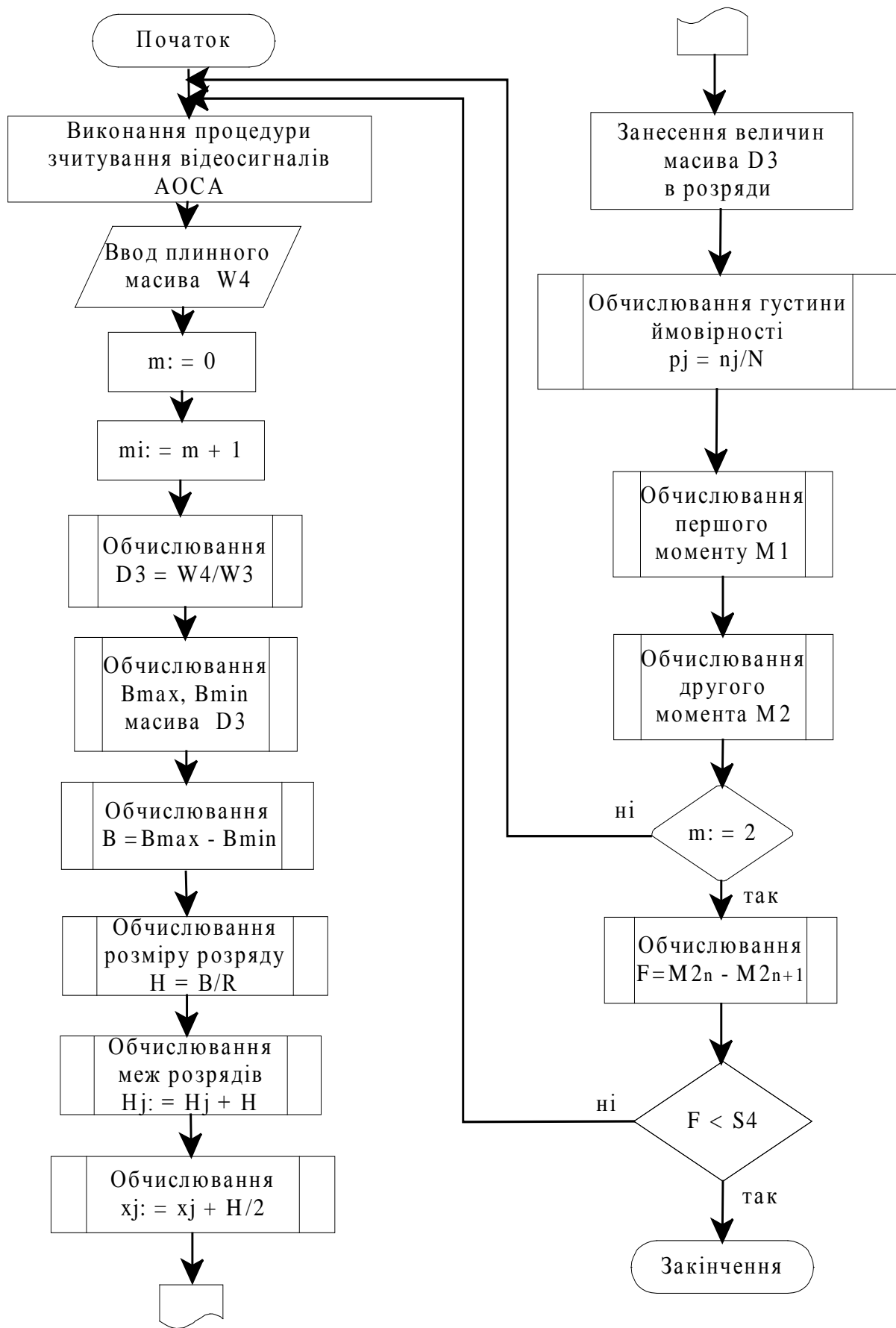


Рис. 5.30. Блок-схема алгоритма визначення критичного зносу PI

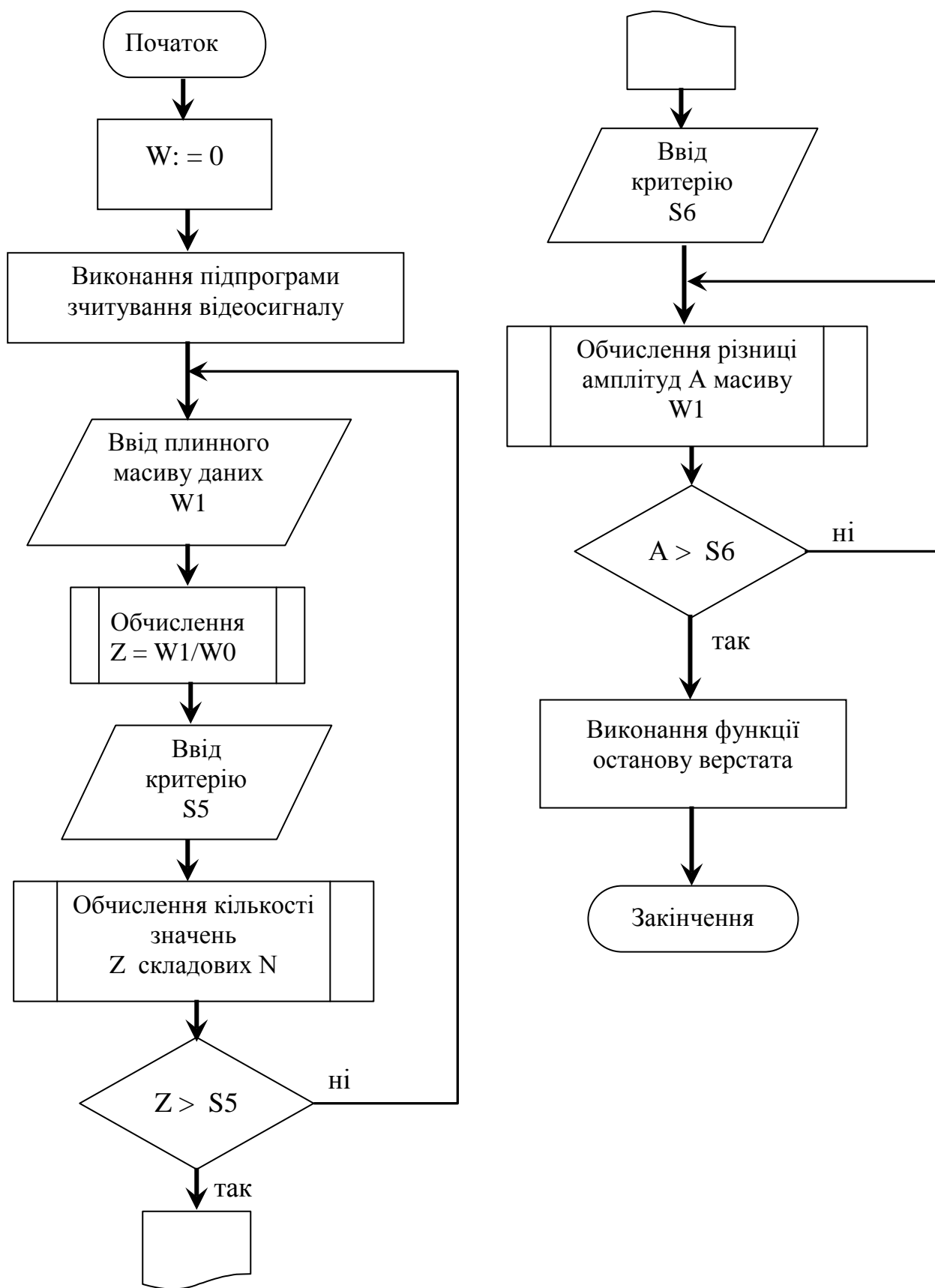


Рис. 5.31. Блок-схема алгоритму керування лазерним аналізатором стану процесу механообробки за високочастотними складовими спектра динамічних сигналів

Здійснюється введення критерію S5, котрий на базі апіорно проведених експериментів визначає значення Z для різних стадій стану РІ та системи ТО. Порівнянням обчисленої величини N з критерієм S5 фіксується наступ зношеності РІ. Якщо N не перевищує значення критерію, то знову вводиться плинне значення масиву W1. Якщо фіксується перебільшення значення критерію, то порівнюються величини амплітуди A масиву W1 спектральних, які складаються послідовно з амплітудою центрального спектру відеосигналу. Підвищена величина різниць фіксує зниження амплітуди в вищих спектрах і наступ зносу різального леза.

Програма закінчується, виконується команда остановка верстата і заміна пошкодженого РІ.

Отже, контроль якості плинного процесу механообробки проводиться лазерним аналізатором в широкому діапазоні спектральної щільності сигналів, котрі ідентифікують динаміку стану системи технологічного обладнання, що дозволяє підвищувати якість деталі, яку оброблюють. Застосування подібних лазерних гібридних систем дозволяє автоматизувати процес контролю і використати його в умовах гнучкого автоматизованого виробництва на ділянках механічної обробки.

### **Перелік посилань до розділу 5**

- 5.1. Вальков В.М. Контроль в ГАП. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 232 с., ил.
- 5.2. Заявка 57-1763 Япония, МКИ G01 B 11/30, G01 B 11/00. Способ измерения износа инструмента. - № 51-109598; Заявл. 13.09.76; № 6-45; Опубл. 12.01.82; НКИ 6666-2F, 6360-2F.
- 5.3. Пат. 4420253 США, МКИ G 01 N 21/00, G 02 B 5/14. Датчик определения износа и поломки режущего инструмента на токарном станке. Method and apparatus for detecting wear or breakage of tools and other objects / Timothy R. - № 323397; Заявл. 20.11.81; Опубл. 13.12.83; НКИ 356/237, 240,73.1,407/120.
- 5.4. Пат 278083 ГДР, МКИ B23 Q 11/04. Устройство для контроля инструмента. Einrichtung zur überwachung rofrierender Zerspanungswerkzeuge - Fischer K.-F., Michael E., Honke W.; VEB Kombinat ORSTA-Hydraulik. - № 3234091; Заявл. 19.12.88; Опубл. 25.04.90.
- 5.5. Диагностика износа и повреждений инструмента с использованием оптических средств и анализа телеизображения // Кукай то когу. = Tool Eng. -1989. -33, № 6. -P.113-119
- 5.6. Automatisiertes Verschleißmeßsystem für rotierende Spindelwerkzeuge / Peiheratelechik. -1989. -38, № 11. -P. 502-503, 527-528
- 5.7. A Laser inerferometre of model ILT 150 by firm Spindler und Hoyer inten-ded for dynamic measurements in the machine tools // Lab. Prax. -1989. -13, № 11. - P.1070.
- 5.8. Marvin K., Soro D. A laser stress-wave probe with sub-angstrem sensitivity and large bendwith // Ultrason. Symp. Proc. San Diego, Calif., Oct. 27-29, 1982. - V.2. -N.Y. - 1982. -P.864-866.
- 5.9. Murphy J., Glass J.T., Majerowicz G. Laser interferometric probe for detec-tion of acoustic emission // Mater. Eval. - 1990. -48, № 6. -P.714-720.
- 5.10. Parekh I. P., Tian H. S. SAW grooved gratings at off-resonance and odd harmonic frequencies // IEEE Ultrasonics Symp. Proc, - 1978. – P. 630 – 633.
- 5.11. Волков В. Г. Обобщенная модель отражающих решеток ПАВ // Тез. докл. и сообщ. шк.-семинара “Устройства акустоэлектроники”. – М.: 1988. – С. 64.
- 5.12. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
- 5.13. Балакиий В.Л., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физическая акустооптика. - М.: Радио и связь, 1985. - 280 с., ил.
- 5.14. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их приме-нение. - М.: Сов. радио, 1978. - 178 с
- 5.15. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. -М.: Наука, 1970. 719 с..
- 5.16. Hallermeier R. J., Mayer W. G., Scattering of a gaussian light beam by ultrasonic surface waves. – //J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 9, p. 3664 – 3667.

- 5.17. Богданов С. В., Ковалев А. В., Петров Д. В., Яковкин И. Б. Рассеивание света на упругих поверхностных волнах. //ЖТФ, 1971, т. 41, № 7, с. 1511 – 1517.
- 5.18. Lean E. G. H., Powell C. G. Optical probing of surface acoustic waves. //Proc. IEEE, 1970, v. 58, N 12. p. 1939 –1947.
- 5.19. Lean E. G. H. Interaction of light and acoustic surface waves. – In: Progress in Optics Ed. E. Wolf. North Holland, 1973, p. 123 – 166.
- 5.20. Alppi A., Palma A., Palmieri L., Socino G. Acoustooptic interaction for most effective deflection of unguided light via acoustic surface waves. //Appl. Optics, 1976. v. 15, N 10, p. 2400 – 2404.
- 5.21. Ключко Т.Р. Моделювання динаміки технологічного процесу для контролю якості токарної обробки деталей типу “вал” // Резание и инструмент в технологических системах. Вып. 57. Харьков: ХГПУ. –2000. -С. 115 – 121.
- 5.22. Остафьев В.А., Г.С. Тымчик, Т.Р.Ключко. Диагностика процесса металлообработки в ГАПС многоканальными лазерными когерентными анализаторами // Применение лазерной технологии для повышения качества изделий. - Тюмень: УДНТП. - 1985. - С.69-71.
- 5.23. Tymchik Gr.S., Klotchko T. The lazer intelligent controller for the production materials processing / Intelligent manufacturing systems. Theory and practice. The 4 International Seminar, Belgrad, Yugoslavia, 1-6 September 1998. - 1998. -P.150.
- 5.24. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б.Гусев, С.В.Кулаков, Б.П.Разживин, Д.В.Тигинж Под ред. С.В.Кулакова. - М.: Радио и связь, 1989. - 136 с., ил.
- 5.25. Акустооптические модуляторы света / В.С.Бондаренко, В.П.Чкалова. - М.: Радио и связь, 1988. - 136 с., ил.
- 5.26. Gr.Tymchik, T.Klotchko. The resolution increase of acoustooptic spectrum analyser // XIV IMEKO Congress, Tampere, Finland, 1-6 June 1997. - 1997. - TC2.
- 5.27. Милер М. Голография: Пер. с чеш. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1979. - 207 с., ил.
- 5.28. С. Солимено, Б. Крозиньяни, П. Ди Порто, Дифракция и волноводное распространение оптического излучения, пер. с англ. -М.: Мир, 1989.
- 5.29. Зверев В.А., Степанов Н.С. Экспериментальная радиооптика. – М.: Наука, 1979.
- 5.30. Исаакович М.Л. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – С. 27.
- 5.31. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностран. лит. Изд. 2-е, 1957.
- 5.32. Катывс Г.П. Модуляция и отклонение светового излучения. – М.: Наука, 1976. – 176 с.
- 5.33. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. – М.: Наука, 1971.
- 5.34. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. – М.: Мир, 1971.

- 5.35. Горяинов В.Т., Журавлев А.В., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Сов. радио, 1980.
- 5.36. Броништейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. - М.: Наука, 1981. - 359 с.
- 5.37. А.с. 860009 СССР, МКИ G 01 B 19/39. Устройство для программного управления металлорежущими станками / В.А.Остафьев, В.Л.Булгач, Т.Р.Клочко, Г.С.Тымчик. - № 2796269/18-24; Заявл. 10.07.79; Опубл. 30.08.81, Бюл. № 32. - 4 с.
- 5.38. А.с. 1580274 СССР, МКИ G 01 R 23/17. Акустооптический анализатор спектра / В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик, Т.Р.Клочко. - № 4426297/24-21; Заявл.18.05.88; Опубл. 23.07.90, Бюл. № 27. - 3 с.
- 5.39. А.с. 1492307 СССР, МКИ G 01 R 23/17. Акустооптический анализатор спектра / В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик, Т.Р.Клочко, В.И.Скицюк. - № 4338530/24-21; Заявл. 02.12.87; Опубл. 07.07.89, Бюл. № 25. - 3 с.
- 5.40. А.с. 1122430 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Устройство управления процессом резания / Т.Р. Клочко, В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик. - № 3598498/25-08; Заявл. 26.05.83; Опубл. 07.11.84, Бюл. № 41. - 3 с.
- 5.41. А.с. 885973 СССР, МКИ G 05 В 19/39, G 05 В 19/417. Многоканальная система адаптивного управления металлорежущими станками / В.Л. Булгач, Т.Р.Клочко, В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик. - № 2880574/18-24; Заявл. 17.12.79; Опубл. 30.11.81, Бюл. № 44. - 5 с.
- 5.42. А.с. 1748995 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Способ контроля состояния режущего инструмента / Остафьев В.А., Жижка Я., Т.Р.Клочко, Луканчевски М.И.
- 5.43. Клочко Т.Р. Лазерная гибридная система контроля качества механо-обработки // Сучасне машинобудування. –2000. - № 1-2. – С. 22 – 27.
- 5.44. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Изд-во Техносфера, 2006.-1701 с.
- 5.45. А.с. 1393531 СССР, МКИ В 23 В 25/06. Устройство управления процессом резания / В.Л.Заковоротный, Т.Р. Клочко, В.А.Остафьев, Г.С.Тымчик. - № 4148612/31-08; Заявл.18.11.86; Опубл. 07.05.88, Бюл. № 17. - 16 с.
- 5.46. А.с. 1589069 СССР, МКИ G 01 В 11/00. Анализатор виброакустических сигналов / Т.Р.Клочко, В.А.Остафьев, В.И.Скицюк, Г.С.Тымчик. -- №4494254/24-28; Заявл. 17.10.88; Опубл. 30.08.90, Бюл. № 32. - 5 с.
- 5.47. Тимчик Г.С., Клочко Т.Р., Скицюк В.І. Метод контролю граничного стану різального інструмента при токарній обробці матеріалів // Наукові вісті НТУУ “КПІ”.-- 1999. - № 2. -С.101-107.
- 5.48. Остафьев В.А. Скицюк В.И., Клочко Т.Р. Устройство контроля состояния сверл в многошпиндельных головках // Технология и организация производства. - 1991. - № 3. - С.33-35.
- 5.49. Тимчик Г.С., Клочко М.М. Ефективна технологія аналізу плинного стану динамічних процесів // Зб.тез доп. наук.-техн. конференції ПРИЛАДО-

*БУДУВАННЯ 2002: підсумки і перспективи, 16- 17 квітня 2002 р. – К.:  
ПП “Графіка”. – 2002. – С.78.*

- 5.50. Тимчик Г.С., Ключко М.М. Метод аналізу стану динаміки процесів та об’єктів в приладобудуванні та медицині // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування. – 2002. – Вип. 24. – С.57-62.*
- 5.51. Gr.S.Tymchik, M.Klotchko. The intelligent system for quality rating of machining material processing // International conference of condition monitoring, Cambridge, UK, 2005. - 2005. –P. 21-23*
- 5.52. Ключко Т.Р. Моделювання динаміки технологічного процесу для контролю якості токарної обробки деталей типу “вал” // Резание и инструмент в технологических системах. Вып. 57. Харьков: ХГПУ. –2000. -С. 115 – 121.*
- 5.53. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Теоретичні засади технології ТОНТОР. Монографія. -К.: НТУУ “КПІ”, 2006. – 234 с., іл.*
- 5.54. Ключко Т.Р., Тимчик Г.С., Ключко М.М. Розробка алгоритмів функціонування лазерних гібридних акустооптичних аналізаторів стану процесу токарної обробки металів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - Хмельницький. - 1998. -№ 4. -С. 33-37.*



## ПІДСУМКИ

Коротко підводячи підсумки розглянутого матеріалу щодо засад оптичних вимірювань та роботи відомих контрольно-вимірювальних оптико-електронних систем та приладів можна дійти висновку про надзвичайно перспективне застосування їх у технологічних процесах механічної обробки матеріалів.

Оптичні вимірювання геометричних величин деталей після механічної обробки надають можливості підвищити якість виготовлення надточних деталей та готових виробів у приладобудуванні та машинобудуванні.

З авторських досліджень випливають наступні висновки. Створена фізична модель інженерії поверхні об'єкту технологічної обробки на підставі дослідження поверхневих акустичних ефектів та субмікроскопічного рельєфу поверхні деталі дозволяє розробити загальні теоретичні засади аналізу стану деталі та інструмента оптичними методами на основі комбінованого аналізу поверхневих ефектів та об'ємних ефектів, що виникають під впливом різання та загальної взаємодії об'єктів; запропонувати моделі взаємодії об'єктів технологічної обробки та оптичного аналізатора стану в ближній та дальній зонах торкання на підставі дослідження світлового випромінювання, відбитого від досліджуваної поверхні.

На підставі розробленої методики визначення стану різального інструмента, заготовки та технологічного обладнання внаслідок оптичної обробки динамічних сигналів, які генеруються зоною різання (сигналів ВАЕ, ЕРС різання), встановлено залежності статистичних характеристик сигналів від режимів різання і стану РІ. Доведено на підставі даних проведених експериментів, що зростання дисперсії амплітуди і частот сигналів динаміки процесу металлообробки відповідає збільшенню стрічки зносу інструмента, що знижує якість ТП металлообробки. Отримані статистичні залежності для відеосигналів лазерного АО аналізатора з урахуванням параметрів розподілу динамічних сигналів на стадії приробки, тривкого різання і зносу різального леза інструмента.

Запропоновані алгоритми роботи системи забезпечують підвищення швидкодії вимірювальних операцій та точності вимірів при виконанні технологічних процесів механічної обробки металів та запобігати ситуаціям руйнуванню інструмента і обладнання, що підвищує ефективність та продуктивність виробничого процесу.