

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА

**Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній**  
**Л. М. Будіянська, І. О. Іванченко, В. В. Янко**

# **ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ БЛИЖНЬОЇ ЛОКАЦІЇ**

**МОНОГРАФІЯ**

*За загальною редакцією Я. І. Лепіха*

ОДЕСА  
ОНУ  
2019

УДК 528.021.7:681.78

О-627

**Рецензенти:**

**С. В. Ленков** – начальник Науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України у галузі науки і техніки;

**О. В. Коваленко** – завідувач кафедри радіоелектроніки Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, професор, доктор фізико-математичних наук;

**Р. М. Пелешак** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедрою фізики Дрогобицького педагогічного університету імені Івана Франка.

Рекомендовано до друку вченою радою  
Одеського національного університету імені І. І. Мечникова.  
*Протокол № 8 від 23.04.2019 року.*

Оптико-електронні системи ближньої локації : монографія  
О-627 / Я. І. Лепіх, В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська та інші. За редакцією Лепіха Я.І. – Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2019. – 294 с.: іл. 51; табл. 10.  
ISBN 978-617-689-298-4

*У монографії описано методи оптичної локації ближнього інфрачервоного діапазону і створення систем на їх основі. Проаналізовані існуючі закономірності проходження оптичного випромінювання на шляху джерело-середовище-об'єкт, яке після відбиття від об'єктів і завад (поверхонь, ландшафтних утворень, середовища) приймається фотоприймачем. Розглянуто оптимізацію формування характеристик зондуючого і відбитого випромінювання на тлі шумів і завад, що забезпечує вирішення завдань достовірного виявлення, вимірювання координат і параметрів руху та розпізнавання об'єктів. Представлено опис існуючих і розроблених авторами методів та принципів побудови систем, адаптованих до діючих на вході оптичного локатора шумів.*

*Монографія може становити інтерес для науковців і фахівців, що працюють в галузі інформаційних систем, оптико-електронних систем ближньої локації, приладобудування, а також для викладачів і студентів відповідних дисциплін.*

**УДК 528.021.7:681.78**

ISBN 978-617-689-298-4

© Лепіх Я. І., Сантоній В. І.,  
Будіянська Л. М. та інші., 2019

© ОНУ імені І. І. Мечникова, 2019

## АНОТАЦІЯ

У монографії описано методи оптичної локації ближнього інфрачервоного діапазону і створення систем на їх основі. Для створення оптико-електронних локаційних систем (ОЕЛС) проаналізовані закономірності проходження, поглинання і розсіювання оптичного випромінювання на шляху джерело-середовище-об'єкт, яке після відбиття від об'єктів і завад (поверхонь, ландшафтних утворень, навколишнього середовища) приймається фотоприймачем.

Розглянуто оптимізацію формування характеристик зондуючого і відбитого випромінювання на тлі шумів і завад, що забезпечує вирішення завдань достовірного виявлення, вимірювання координат і параметрів руху та розпізнавання об'єктів.

Представлено опис існуючих і розроблених авторами методів та принципів побудови систем, адаптованих до діючих на вході оптичного локатора шумів.

Описано запропоновані методи та системотехнічні рішення для боротьби з перешкодою зворотного розсіювання, в тому числі, при складних метеорологічних умовах.

В окремих розділах описано ОЕЛС різного функціонального призначення, розроблених авторами.

У першому розділі наведено аналітичний аналіз проблем і досягнень та огляд існуючих систем ближньої оптичної локації, принципів їх побудови, особливостей функціонування (теоретичні засади, методи і засоби).

Представлено розроблений інтелектуальний оптико-електронний перетворювач для інформаційно-вимірювальних систем та високоточний швидкісний мікроелектронний лазерний далекомір. Описано принципи

побудови та особливості їх функціонування, а також розроблену методику розрахунку величини сигналу, що необхідна для забезпечення заданих імовірнісних характеристик виявлення.

У другому розділі представлена методика вимірювання параметрів відбитого лазерного випромінювання в системах оптичної локації в наносекундному часовому діапазоні, що підвищує точність, ефективність, надійність та швидкодію вимірювань.

На основі теоретичних положень проведено аналіз енергетичних співвідношень для локаційних систем з поширеним видом фотоприймача – фотодіодом. Виведені співвідношення, що визначають ймовірності помилкової тривоги і пропуску цілі.

У третьому розділі, на засаді описаного у другому розділі методу виявлення сигналів, наведена автоматизована система оперативного моніторингу рівня води у відкритих водоймах на базі телекерованих лазерних рівнемірів для попереджувального протипаводкового оповіщення населення та забезпечення екологічної безпеки.

У четвертому розділі наведено розгляд створеної універсальної системи автоматичного дистанційного безперервного моніторингу вібрацій об'єктів у режимі on-line на основі мікроелектронних лазерних датчиків, комп'ютерної техніки та засобів телекомунікації, що підвищить надійність та безпеку експлуатації об'єктів.

У п'ятому розділі представлено опис мультипараметричного мікроелектронного лазерного сенсора, здатного до одночасного контролю декількох параметрів повітряного басейну навколишнього середовища в режимі безперервного спостереження. Описано розроблений цифровий метод вимірювання

коефіцієнта направленого відбиття і параметрів відбитих світлових потоків, що забезпечує високу точність вимірювання - до  $10^{-1}$  %.

Монографія складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку умовних позначень, скорочень, термінів та списку використаних джерел з 173 найменувань.

Загальний обсяг монографії становить сторінок – 296, включаючи: рисунків – 51, таблиць – 10.

Результати робіт використані в 59 опублікованих роботах авторів (наведено у списку використаних джерел), що включені до переліку наукових фахових видань України, в тому числі рекомендованих ВАК, та входять до наукометричних баз даних, а також використовуються в навчальному процесі.

За результатами досліджень отримано 6 патентів України. Основні наукові і практичні результати досліджень доповідалися та обговорювалися на Міжнародних і Українських конференціях та виставках.

Монографія може становити інтерес для науковців і фахівців, що працюють в галузі інформаційних систем, оптико-електронних систем ближньої локації, приладобудування, а також для викладачів і студентів відповідних дисциплін.

## **УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, СИМВОЛИ, ОДИНИЦІ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН, СКОРОЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ**

АКП – автоматичне керування підсиленням  
АРП – автоматичне регулювання підсилення  
АЦП – аналого-цифровий перетворювач  
БК – блок керування  
БНЛВ – блок накачки лазерного випромінювача  
БПП – багатовходовий пороговий пристрій  
БРОВ – блок реєстрації і обробки вібросигналу  
В – випромінювач  
ВЧ-сигнал – високочастотний сигнал  
Г – гетеродин  
ДВУ – динамічна вимірювальна установка  
ДХ – дистанційна характеристика  
ЕПВ – ефективна поверхня відбиття  
ЕПР – ефективна поверхня розсіювання  
Ерс – електрорушійна сила  
ЗГ – задавальний генератор  
ЗМ – змішувач  
ІВС – інформаційно-вимірювальна система  
ІЧ – інфрачервона область  
КП – коефіцієнт поглинання  
КП – коливна поверхня  
ЛВ – лазерний випромінювач  
ЛІ – лічильник імпульсів  
МПС – мультипараметричний сенсор  
ОВ – оптичне випромінювання  
ОЕД – оптико-електронний далекомір  
ОЕІС – оптико-електронна інформаційна система  
ОЕЛС – оптико-електронна локаційна система  
ОЕП – оптико-електронний перетворювач  
ОЛВ – оптико-локаційний віброметр

ОЛС – оптико-локаційний сенсор  
ОЛП – оптико-локаційний пристрій  
СВУ – статична вимірювальна установка  
П – повторювач  
ПЗ – програмне забезпечення  
ПЗП – перепрограмований запам'ятовуючий пристрій  
ПО – підсилювач-обмежувач  
ПП – підсилювач потужності  
ППС – підсилювач постійного струму  
РКІ – рідкокристалічний індикатор  
РП – резонансний підсилювач  
СФ – смуговий фільтр  
ТП – телеметричний пристрій  
Ф – потужність світлового потоку  
ФД – фазовий детектор  
ФНЧ – фільтр низьких частот,  
ФП – фотоприймач  
ЦАП – цифровий аналоговий перетворювач  
ШП – широкосмуговий підсилювач

$c$  – швидкість світла

$E$  – опроміненість

$E_e$  – опроміненість у площині об'єкта, перпендикулярній до падаючого потоку

$I_e$  – сила відбитого випромінювання в напрямку до приймального пристрою

$I_l$  – інтенсивність випромінювання, що пройшло шлях  $l$

$I_o$  – інтенсивність випромінювання на виході оптичної системи ОЕП

$f$  – частота зондуючого сигналу

$f_m$  – частота модуляції

$k_\phi$  – коефіцієнт форми

$I$  – яскравість випромінювача  
 $l$  – відстань (дистанція)  
 $P$  – потужність випромінювання  
PSpice – програма моделювання електронних схем  
 $S_{\text{фп}}$  – інтегральна чутливість фотоприймача  
 $t$  – час  
 $U$  – локаційний сигнал  
 $v$  – швидкість

$\beta$  – коефіцієнт зворотного розсіювання  
 $\Delta L$  – величина віброзміщення  
 $\Delta l$  – похибка вимірювання дистанції  
 $\Delta\varphi$  – фазовий зсув  
 $\rho$  – коефіцієнт відбиття  
 $\tau$  – показник ослаблення  
 $\tau_c$  – коефіцієнт ослаблення середовища  
 $\tau_o$  – коефіцієнт поглинання  
 $\varphi$  – фаза



## З М І С Т

Умовні позначення, символи, одиниці фізичних величин, скорочення та терміни	6
<b>ВСТУП</b>	12
<b>1. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ</b>	20
1.1. Методи обробки інформації з елементами інтелектуалізації в оптико-електронних перетворювачах (ОЕП)	20
1.2. Вплив завадової ситуації і відбивальних властивостей об'єкта на структуру інформаційного сигналу	25
1.3. Шляхи інтелектуалізації та алгоритм роботи ОЕП у режимі швидкісного руху	31
1.4. Банк даних образів об'єктів зондування різної фізичної природи	39
1.5. Комп'ютерне моделювання оптичного каналу та схем ОЕП	52
1.6. Експериментальні дослідження ОЕП у статичному і динамічному режимах	65
Основні результати і висновки до розділу 1	70
Список використаних джерел до розділу 1	72
<b>2. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ НАНОСЕКУНДНОГО ЧАСОВОГО ДІАПАЗОНУ В СИСТЕМАХ БЛИЖНЬОЇ ЛОКАЦІЇ</b>	76
2.1. Оптико-локаційні методи вимірювання малих відстаней	76

2.2.	Математичний розрахунок та структурна схема фазового методу	82
2.3.	Методи і засоби вимірювання параметрів інформаційного сигналу в умовах обмеження часу	93
	Основні результати і висновки до розділу 2	135
	Список використаних джерел до розділу 2	136
<b>3.</b>	<b>ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ВОДИ У ВІДКРИТИХ ВОДОЙМАХ</b>	<b>141</b>
3.1.	Задачі гідрометрії та гідрологічна модель водного об'єкта	142
3.2.	Система моніторингу та засоби контролю рівня води	149
3.3.	Лазерний рівнемір та інтерфейс зв'язку з керуючим комп'ютером системи моніторингу	157
3.4.	Натурні випробування системи моніторингу рівня води	176
3.5.	Практичне використання ОЕС	182
	Основні результати і висновки до розділу 3	185
	Список використаних джерел до розділу 3	186
<b>4.</b>	<b>ВІБРОДІАГНОСТИЧНА ДИСТАНЦІЙНА АВТОМАТИЧНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА</b>	<b>190</b>
4.1.	Методи та засоби вимірювання і аналізу параметрів вібрацій	191
4.2.	Метод дистанційної реєстрації вібраційних коливань та алгоритм роботи оптико-електронного локаційного віброметра (ОЛВ)	206

4.3.	Технічні та програмні складові вібродіагностичної системи	213
4.4.	Практичне використання ОЛВ	231
	Основні результати і висновки до розділу 4	235
	Список використаних джерел до розділу 4	236
<b>5.</b>	<b>МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СЕНСОР МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>	<b>240</b>
5.1.	Мультисенсорні інформаційні системи	241
5.2.	Цифрові методи та пристрої вимірювання коефіцієнта відбиття	244
5.3.	Функціональні задачі мультипараметричного сенсора (МПС)	257
5.4.	Координатний метод вимірювання дальності МПС	262
5.5.	Аналого-цифровий перетворювач різниці фаз	271
5.6.	Алгоритм роботи МПС	275
5.7.	Практичне використання МПС	280
	Основні результати і висновки до розділу 5	283
	Список використаних джерел до розділу 5	285
	<b>Основні висновки</b>	<b>288</b>

## ВСТУП

Оптико-електронна (лазерна) локація є одним з важливих напрямів сучасної оптики і локаційної техніки, яка дозволяє отримувати інформацію про об'єкт по відбитому сигналу зондуючого випромінювання. Перевагою, в порівнянні з радіо та іншими видами локації, є отримання більш високої спрямованості зондуючого випромінювання і просторово-часової роздільної здатності визначення параметрів об'єкта спостереження.

Актуальною є проблема виявлення, вимірювання, наведення і розпізнавання з максимальною ефективністю в умовах дії різних природних і штучних завад. Відмінні ознаки об'єктів, фонів і завад, що накладаються на локаційні сигнали, визначають структуру, алгоритм прийняття рішення та вихідні характеристики локаційних систем. Актуальна також розробка нових локаційних методів вилучення інформації про віддалені об'єкти (наземні, повітряні) в оптичному діапазоні.

Системи ближньої оптичної локації є такими, для яких часова протяжність відстані до цілі порівнянна або трохи більше тривалості випромінюваного сигналу. До цього класу належать неконтактні імпульсні оптичні датчики цілі, датчики перешкод, системи ближньої навігації, в яких одночасно з виявленням перешкоди здійснюється визначення відстані до неї.

Найважливішою характеристикою інформаційної системи є її роздільна здатність по дальності. Традиційно функціонування систем ближньої оптичної локації засноване на класичній процедурі прийняття рішень, що при обліку ймовірності помилкової тривоги і пропуску цілі, а також на вимірювання дистанції з точністю не гірше 1 %, що повинно забезпечити співвідношення сигнал/шум не менше, ніж 7 [1, 2]. При цьому знизити вимогу до

величини сигналу в системах ближньої локації виявляється неможливим внаслідок інерційності фотоприймача, в якості якого найчастіше використовується фотодіод. Інерційність (затримання) прийому є характерною рисою систем ближньої оптичної локації.

У цих системах актуальною є також задача отримання інформації про об'єкти, що володіють «блискучими» точками в оптичному діапазоні (оптико-електронні прилади спеціальної техніки), що дозволяє проводити розпізнавання та ідентифікацію спостережуваних об'єктів.

Великий практичний інтерес представляє питання виявлення віддалених об'єктів, що не володіють достатньою відбивальною здатністю, наприклад сучасні безпілотники. З урахуванням вище наведених прикладів можливо зробити висновок, що розробка та дослідження нових методів отримання інформації засобами ближньої оптичної локації про різні віддалені об'єкти (наземні та повітряні) є актуальною.

Сучасний етап розвитку оптико-локаційної техніки характеризується розширенням кола вирішуваних задач, зростанням вимог та відповідним ускладненням структури систем.

Застосування оптичної локації для вимірювань у ближній зоні (0–15 м) стикається з додатковими труднощами, обумовленими специфічними особливостями роботи. До них належать дефіцит часу обробки інформації, широкий діапазон зміни параметрів робочих сигналів, функціонування в складних умовах експлуатації з проходженням сигналу через неоднорідне середовище. Це ускладнює застосування відомих локаційних методів та робить актуальним створення нових спеціальних методів з використанням динаміки параметрів відбитого оптичного випромінювання у наносекундних процесах.

Підвищення точності та швидкодії вимірювань в ближній оптичній локації пов'язано із зменшенням тривалості зондуючих імпульсів та підвищенням потужності випромінювання. Розширення часового діапазону в наносекундну область передбачає зсув частотної характеристики пристроїв системи у гігагерцовий діапазон шляхом збільшення швидкодії активних елементів, що дозволяє збільшити точність вимірювань.

До пристроїв систем ближньої оптичної локації висуваються жорсткі вимоги по енергоспоживанню при мінімальних габаритно-масових характеристиках. Вирішення проблеми забезпечення заданих енергетичних і габаритно-масових характеристик роботи зазначених систем криється в знаходженні нових процедур прийняття рішень. Найбільш перспективним рішенням проблеми є розробка нових методів і принципів побудови систем, адаптивних до діючих на вході оптичного локатора шумів. Адаптація до дії шумів передбачає необхідність прийому відбитого від цілі сигналу в найбільш сприятливий для цього момент.

Пошук розподілів часових інтервалів, як інструмент для розробки адаптивних принципів побудови систем ближньої оптичної локації, виявляється актуальною проблемою і в інших областях, таких як сейсмологія, біологічні системи і лазерна оптика. Незважаючи на важливість зазначеної проблеми, рішення її до цих пір не знайдено в працях фахівців різних напрямків фізики та математики [3, 4]. Необхідна розробка принципів шумової синхронізації випромінювання та структурних схем, які її забезпечують, в системах ближньої імпульсної оптичної локації. Системи ближньої локації зазвичай працюють в складних атмосферних умовах (туман, дощ, задимлення, хмарність тощо).

Важливою та актуальною для систем ближньої оптичної локації є також проблема боротьби з завадою зворотного розсіювання, яка представляє найбільш інтенсивну перешкоду. Величина зворотного розсіювання, в залежності від умов роботи, може бути рівною або навіть перевищувати величину корисного сигналу при відсутності апріорної інформації про її характеристики [5, 6]. Оскільки максимум завади приходить на момент детектування корисного сигналу, а в умовах роботи в ближній зоні часове стробування використовувати неможливо, то розробка інших шляхів боротьби зі зворотним розсіюванням є актуальною. Тому необхідні нові способи, які працюють при складних метеорологічних умовах.

Сучасні методи з використанням оптичного випромінювання забезпечують вимірювання дистанцій від часток метра до десятків кілометрів [7]. Проблему дистанційного контролю простору у ближній зоні вирішують високоточні мікроелектронні лазерні далекоміри малих відстаней для швидкісних систем та інтелектуальні оптико-електронні перетворювачі для інформаційно-вимірювальних систем [8]. В динамічних умовах застосування необхідне урахування просторової та часової залежності локаційних сигналів від параметрів руху об'єкта.

Актуальна і розробка методики розрахунку величини сигналу, достатнього для забезпечення імовірнісних характеристик виявлення швидкісних об'єктів на заданих дистанціях. Необхідна розробка схемно-конструкторських рішень мікроелектронних лазерних далекомірів та перетворювачів малих відстаней, що реалізують принцип шумової синхронізації випромінювання. При швидкостях руху об'єкта локації до 30 м/с для розпізнавання його образу по множині ознак та обробки інформації придатні

методи прийняття рішення у режимі часових обмежень. Фазовий метод вимірювання, використаний в оптико-електронних перетворювачах та мікроелектронних лазерних далекомірах, забезпечить обробку швидкозмінної інформації у процесі дистанційного контролю просторової зони [9].

У більшості випадків оптико-електронні лазерні перетворювачі та далекоміри функціонують в газоподібних або дисперсних середовищах, що характеризуються коефіцієнтами розсіяння і заломлення, які впливають на зміну структури сигналу при передачі його від джерела до приймача. Основна задача мікроелектронних лазерних локаційних пристроїв – визначення координат і параметрів руху об'єкта. Інформаційний оптичний сигнал, що являє собою серію імпульсів, по каналу зв'язку середовище–поверхня об'єкта–середовище попадає від випромінювача оптико-електронного лазерного перетворювача локаційного типу до об'єкта і відбивається на фотоприймач.

Аналіз змін потоку випромінювання дає інформацію про характеристики середовища поширення оптичного випромінювання або поверхні відбиття, що знаходиться перед лазерним локаційним перетворювачем або далекоміром. Вплив відбиваючої поверхні враховується за допомогою коефіцієнта відбиття. Актуальною є розробка системотехнічних рішень для реалізації роботи мікроелектронного лазерного перетворювача в умовах завод природного та штучного походження.

У системах ближньої дії, в яких існують жорсткі обмеження за рівнем потужності випромінювання та порогової чутливості, стає задача по оцінці сигналу на фотоприймачі [9]. У теорії оптичної локації переважають дві моделі оцінки сигналу, що описують його амплітудно-часове розподілення: квантова та аналітична.



У ближній локації перевага віддається аналітичній моделі сигналу, згідно з якою у рівнянні оптичної локації мірою залежності щільності потоку енергії є коефіцієнт відбиття. Для підвищення точності, ефективності, надійності та швидкодії вимірювань потрібно розробити нову методику вимірювання параметрів відбитого оптичного (лазерного) випромінювання в локаційних системах ближнього діапазону. Для визначення мінімальної величини сигналу, необхідної для забезпечення заданих імовірнісних характеристик виявлення, актуальна розробка методики енергетичного розрахунку оптико-електронного перетворювача.

Дана монографія присвячена проблемі отримання оптико-локаційними методами дослідження інформації про об'єкт та її практичного використання в системах ближньої локації. Для вирішення зазначеної проблеми використовувалися методи геометричної оптики, оптичної локації, аналітичної геометрії, гармонічного аналізу, диференціального обчислення, імітаційне, комп'ютерне та фізичне моделювання.

Практична значимість розроблених нових методів вимірювання параметрів оптичного випромінювання у динамічних локаційних системах, а також цифрової обробки інформаційних сигналів в умовах обмеження часу обробки, полягає в можливості створення різних автоматичних інформаційно-вимірювальних систем моніторингу об'єктів спостереження.

Зокрема, для попередження наслідків катастрофічних повеней та паводків необхідний постійний моніторинг рівня води, що дозволяє визначати об'єм водотоку та прогнозувати виникнення затоплень. Для узагальнень гідрологічного стану водних об'єктів, екологічної безпеки та попереднього протипаводкового оповіщення населення актуальна розробка автоматизованої системи контролю

води у відкритих водоймах на основі лазерних телекерованих датчиків рівня води, яка б забезпечила оперативний зв'язок між гідрометричними постами і центром збирання та обробки інформації сучасними засобами зв'язку.

Іншим практичним застосуванням систем оптичних локаційних систем є вирішення проблеми боротьби зі шкідливим впливом вібрації на об'єкти в багатьох галузях сучасної техніки. Забезпечення безаварійної експлуатації будівель, великогабаритних конструкцій та інженерних споруд, а також екологічно небезпечних об'єктів є важливою та актуальною проблемою нашого часу. Безперервний моніторинг їх стану за допомогою оптико-електронних систем дозволяє забезпечити постійне спостереження за деформаційною картиною вказаних об'єктів та формування необхідних рішень при різних станах технічного та фізичного середовища.

Вирішення проблеми передбачає розробку автоматизованої вібродіагностичної інформаційно-вимірювальної системи на основі автономних телекерованих лазерних віброметрів. У перелік вимог до вібродіагностичної системи входить забезпечення вимірювання локальних і загальних вібраційних характеристик та полів коливних об'єктів на дистанції до 15 м, їх площинного розподілу та змін у часі, тобто вібраційних прискорень, які мають високу стабільність параметрів, не потребують періодичного калібрування зі зняттям з об'єкта експлуатації.

Актуальною тенденцією розвитку систем екологічного моніторингу є розробка інтелектуальних пристроїв, побудованих на базі твердотільних сенсорів і сучасних обчислювальних засобів. Існуючі аналітичні прилади з «жорсткою» структурою побудови мають великі габаритні розміри, складну схемну реалізацію, вузьку

спеціалізацію, що робить їх малоефективними при проведенні аналітичного вимірювального процесу і призводить до великої втрати енергетичних, матеріальних та інтелектуальних ресурсів.

Сучасний рівень складності завдань, що вирішуються за допомогою інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища постійно зростає, тому розробка мікроелектронних мультипараметричних сенсорів (МПС) нового покоління, що функціонують в умовах впливу дестабілізуючих зовнішніх чинників є актуальною. Для створення МПС необхідна розробка цифрового методу вимірювання коефіцієнта направленої відбиття і параметрів відбитих світлових потоків, що збільшує точність вимірювання до  $10^{-1}$  % та спрощує вимірювальну апаратуру.

Створення інтелектуального МПС, здатного до одночасного контролю декількох параметрів повітряного простору, обліку зовнішніх впливів, вилучення з них корисної інформації, оптимальної зміни режимів роботи та його сполучення з комп'ютерним центром управління, забезпечує дистанційний контроль стану навколишнього природного середовища.

Проведення автоматичного моніторингу навколишнього середовища дозволяє своєчасно приймати заходи в разі нестандартного розвитку ситуацій. МПС використовують інтелектуальні інформаційні технології зі застосуванням стільникового зв'язку GSM-формату для прямої передачі вимірюваної інформації та управління роботою системи автоматичного моніторингу в зворотному напрямку.

Висока швидкодія, чутливість та стабільність роботи МПС дає можливість прогнозувати небезпечні ситуації, запобігати аварійним процесам та попереджати їх наслідки.

# **1. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

## **1.1. Методи обробки інформації з елементами інтелектуалізації в оптико-електронних перетворювачах**

Однією із задач оптико-електронних перетворювачів (ОЕП) є розділення в просторі ознак образів об'єктів та заводових факторів, а також вибір таких ознак, для яких це розділення буде оптимальним. Тому при проектуванні ОЕП суттєву роль виграє вибір найбільш інформативних ознак об'єктів.

Більшість оптичних далекомірів для ближньої зони не мають необхідної точності вимірювань у зв'язку з використанням амплітудного методу вимірювань. Найбільш перспективними для високошвидкісних систем є фазові та імпульсні методи далекометрії.

Робочий сигнал в ОЕП активного типу створюється внаслідок опромінення об'єкта певним чином сформованим зондуючим імпульсом і відбиття в напрямку прийому частини променистого потоку.

На характеристики прийнятого робочого сигналу збоку об'єкта чинять вплив наступні фактори: габаритні розміри об'єкта, конфігурація та відбивальні властивості його поверхні, розташування (орієнтація) його в оптичному полі ОЕП. При визначенні характеристик робочого сигналу основні труднощі виникають при оцінюванні відбивальних властивостей об'єкта у випадку заданих умов спостереження (часового і просторового формування сигналу, розташування об'єкта в оптичному полі).

У формуванні відбитого сигналу приймає участь або уся видима (опромінена) поверхня об'єкта, або окремі

зони, крім того можливе послідовне спостереження різних зон. З точки зору впливу об'єкта на часові характеристики відбитого сигналу відрізняються випадки стаціонарного і нестаціонарного опромінення. Останній випадок має місце при достатньо коротких зондуючих імпульсах, коли дистанція поширення випромінювання за час тривалості імпульсу стає порівнянною з радіальною протяжністю опромінюваної поверхні. При цьому відбиття випромінювання супроводжується зростанням тривалості і, у загальному випадку, зміною форми променевого імпульсу.

В умовах стаціонарного опромінення об'єктів відбивальні властивості останніх зазвичай характеризуються ефективною поверхнею відбиття (ЕПВ), що визначається співвідношенням

$$Q_e = \pi I_e / E_e, \quad (1.1.)$$

де  $I_e$  – сила відбитого випромінювання в напрямку до приймального пристрою;

$E_e$  – опроміненість у картинній площині об'єкта, перпендикулярній до падаючого потоку.

В умовах нестаціонарного опромінення об'єктів часове перетворення сигналу при відбитті повинно враховуватися при оптимізації характеристик виявлення та вимірювання параметрів сигналу. Внаслідок залежності часових характеристик відбитих імпульсів від типів об'єктів та умов спостереження при певних умовах необхідно приймати до уваги випадковий характер сигналу.

У режимі нестаціонарного опромінення об'єкт може розглядатися як лінійний фільтр, що послаблює променевий сигнал та перетворює його часову характеристику. Тому для опису відбивальних

властивостей об'єкта можуть використовуватися імпульсні або частотні характеристики, що застосовуються в теорії лінійних ланцюгів.

З урахуванням співвідношення (1.1) передавальною функцією (частотною характеристикою) об'єкта зветься комплексна функція

$$K_e(j\omega) = \pi S_1(j\omega) / S_E(j\omega) , \quad (1.2.)$$

де  $S_E(j\omega)$  та  $S_1(j\omega)$  – перетворення Фур'є відповідно від часових функцій  $E_e(t)$  та  $I_e(t)$ . При цьому в якості вхідного діяння розглядається функція  $E_e(t) / \pi$ .

Передавальна функція  $K_e(j\omega)$  узагальнює поняття ЕПВ об'єкта на випадок нестаціонарного опромінення. Зокрема, у режимі стаціонарного опромінення  $K_e(j\omega) = K_e(0) = Q_e$ .

У часовій області для опису відбивальних властивостей об'єкта може бути використана його імпульсна характеристика  $g_e(t)$ , або функція ваги, що визначається співвідношенням

$$g_e(t) = \pi I_{e\delta}(t) / A , \quad (1.3.)$$

де  $I_{e\delta}(t)$  – функція  $I_e(t)$  при зондуючому імпульсі у вигляді  $\delta$ -функції;

$A$  – поверхнева щільність енергії зондуючого сигналу в картинній площині об'єкта.

Функції  $K_e(j\omega)$  та  $g_e(t)$  пов'язані між собою парою перетворень Фур'є, тобто

$$K_e(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_e(t) e^{j\omega t} dt$$

та

$$g_e(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K_e(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Найбільший практичний інтерес являють імпульсні характеристики об'єктів, хоча в ряді випадків для уніфікації аналітичного опису системи в цілому можуть зі зручністю використовуватися також їхні частотні характеристики. У випадку оптичноізотропної поверхні об'єкта аналітичний вираз для  $Q_e$  має вигляд

$$Q_e = \int_S r(\gamma) \cos^2 \gamma ds, \quad (1.4.)$$

де  $S$  – видима поверхня об'єкта;

$\gamma$  – кут між напрямком опромінення (прийому) і нормаллю до елемента поверхні  $ds$ ;

$r(\gamma)$  – коефіцієнт яскравості елемента поверхні.

Поряд з ЕПВ, відбивальні властивості об'єктів характеризуються також ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР), що визначається залежністю

$$\sigma_e = 4\pi I_e / E_e.$$

Розглянуті характеристики  $Q_e$ ,  $K_e(j\omega)$  та  $g_e(t)$  дозволяють визначити відбитий сигнал у еталонних умовах, що передбачають рівномірність поля випромінювання та прийому у робочій зоні, а також

спостереження з більших дистанцій у порівнянні з розмірами об'єкта. Характеристики  $Q_e$ ,  $K_e(j\omega)$  та  $g_e(t)$  залежать лише від властивостей самих об'єктів і тому вважаються характеристиками саме об'єктів.

Для сучасних імпульсних ОЕП активного типу у цілому ряді типових ситуацій кутові розміри об'єкта порівнянні з шириною діаграми спрямованості. У цих випадках необхідно рахуватися з нерівномірністю оптичного поля у межах габаритів об'єкта. Відбитий сигнал буде визначатися не тільки властивостями об'єкта, але і параметрами діаграми спрямованості та її орієнтацією на об'єкт. Зміна орієнтації може носити як закономірний, так і випадковий характер, пов'язаний, наприклад, з динамічними помилками кутового супроводження.

Таким чином, можна казати про системні відбивальні характеристики, залежні від параметрів ОЕП та умов спостереження. Відомо, що найбільша інформація про об'єкт міститься у контурі його зображення, тому для селекції обирається набір геометричних інформативних ознак, таких як висота, протяжність, симетрія та інші.

Одною з найбільш інформативних ознак об'єктів є площа заданого перерізу тривимірного зображення або його горизонтальної проекції. Перспективною ознакою об'єкта являється коефіцієнт форми

$$k_{\phi} = P^2 / S,$$

де  $P$  – периметр поверхні (проекції),

$S$  – площа проекції на горизонтальну площину.

Коефіцієнт форми є скороченим описом зображення на базі декількох параметрів, інваріантним до зміни ракурсу та кута нахилу об'єкта.



## **1.2. Вплив завадової ситуації і відбивальних властивостей об'єкта на структуру інформаційного сигналу**

Відкритий оптичний канал, через який двічі проходить світловий потік у процесі вимірювань в ОЕП, є джерелом перешкод і спотворень, боротьба з якими є однією з основних задач, що вирішуються при виділенні корисної інформації.

Забезпеченням надійного прийому сигналу при наявності перешкод і спотворень служить урахування змін структури оптичного сигналу в залежності від стану атмосферного каналу.

Для повномасштабного врахування завадових впливів розроблена модель ОЕП як оптико-електронної інформаційної системи (ОЕІС), що переміщується у випадково неоднорідному середовищі атмосферного каналу в умовах аерозольних і електромагнітних перешкод.

Інформація, що передається по каналу зв'язку, зазнає серйозних змін, трансформується й у точку прийому приходить у спотвореному вигляді в порівнянні з переданою. Характер цих змін залежить від загальних властивостей каналу зв'язку – середовища розповсюдження сигналу і поверхні відбиття.

Згідно з узагальненою системною моделлю ОЕП як ОЕІС інформаційний оптичний сигнал по каналу зв'язку “середовище–поверхня–середовище” попадає від випромінювача ОЕП на його приймальну апертуру.

Розглянемо вплив середовища розповсюдження оптичного випромінювання.

У разі однорідності атмосфери між ОЕП і поверхнею об'єкта її вплив на випромінювання описується законом Бугера [7]:

$$I_l = I_o \exp(-\tau \cdot l),$$

де  $I_l$  – інтенсивність випромінювання, що пройшло шлях  $l$ ;

$I_o$  – інтенсивність випромінювання на виході оптичної системи випромінювача ОЕП;

$\tau$  – показник ослаблення.

За даними [7] більшість хмар і туманів має коефіцієнт розсіяння менше 0,8. Дими, що являють собою аерозольні утворення штучного походження, послаблюють світловий потік у 10 разів при збільшенні оптичної щільності середовища на 20 %. При концентрації диму 600-800 мг/м<sup>3</sup> має місце повна утрата видимості на відстані 1,0...1,5 м. Очевидно, що щільні димові аерозолі здатні впливати на роботу ОЕП.

У випадку малих відстаней (2...5 м) збільшення концентрації водяних чи димових аерозолей може призвести до повної втрати видимості. Очевидно, що зворотне розсіювання світлової енергії від аерозольних утворень природного і штучного походження може створювати істотну перешкоду для роботи ОЕП.

Удосконалювання оптико-електронних навігаційних систем припускає порівняльний аналіз структури сигналів, відбитих від зосередженої перешкоди і метеоутворень природного походження.

Однією з визначальних ознак при аналізі відбитого сигналу є крутість наростання його амплітуди. Закон зміни потужності на вхідному вікні фотоприймача в залежності від дальності  $L$  визначається аргументом  $1/L^2$  для зосередженої перешкоди і  $e^{\sigma_p L}$ , де  $\sigma_p$  – коефіцієнт розсіювання, для аерозольних утворень [9].

Це означає, що завадовий сигнал повільно змінюється в порівнянні із сигналом від перешкоди, а при малих

відстанях вироджується в лінійну функцію, що може бути ефективно використане для їхнього розрізнення.

Експериментальні дослідження властивостей атмосферних оптичних перешкод показали, що вони впливають на зонduючий імпульс навігаційної системи і його амплітудні і часові характеристики [10].

Відомо [8], що сигнал від протяжної цілі є нефлуктуючим процесом. При опису структури завадового сигналу від однорідної хмарності існують протиріччя, відповідно до яких цей сигнал може бути представлений одночасно у вигляді флуктуючого і нефлуктуючого процесу, що підтверджується результатами практичних досліджень. Тому точний опис статистичної структури завадового сигналу, у тому числі для реальної хмарності, одержується при безпосередніх випробуваннях конкретного ОЕП. В разі малих відстаней (2...5 м) енергетичне ослаблення оптичного сигналу за рахунок розсіяння в замутненій атмосфері потрібно вважати зневажливо малим.

Аналіз впливу завадових засвітлювань надає наступне. На вхід фотоприймального пристрою ОЕП нарівні з корисним оптичним сигналом надходить завадовий, який зазвичай складається з флуктуацій світового фону і прямого сонячного засвітлювання. Основними джерелами зовнішніх природних завад є випромінювання небесних тіл, Землі та її покрівів, атмосфери та її утворень.

Найбільшу небезпеку являє пряме попадання Сонця, вірніше його зображення, на поверхню фотоприймача. До поверхні Землі від Сонця через атмосферу доходить в основному випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,3...3,0 мкм. На майданчику, перпендикулярному напрямку на Сонце, воно створює енергетичну освітленість  $1350 \text{ Вт/м}^2$  або освітленість понад  $10^5$  лк.

Відомі методи зменшення впливу прямого сонячного засвітлювання малоефективні, тому на практиці зазвичай прагнуть виключити можливість прямого попадання Сонця в поле зору ОЕП, якщо це не суперечить його призначенню і умовам функціонування.

Розсіяне світло ясного неба створює на земній поверхні освітленість, що становить 20...30 % від освітленості, що створюється прямим сонячним засвітлюванням. Це для безхмарного неба становить 500 лк, а при суцільній хмарності меншає до  $1 \cdot 10^{-4}$  лк. Коли фон, на якому проектується об'єкт, що спостерігається, не є рівномірним, то це рівносильно впливу на приймач флюктууючого потоку засвітлювання. Цей потік можна представити як суму двох складових – постійної, що погіршує чутливість, і змінної. Змінна складова безпосередньо бере участь в утворенні сигналу перешкоди.

Експериментальна оцінка енергетичного часового спектра змінної складової фону показує [9], що для більшості реальних умов переміщення ОЕП відносно поверхні 90 % всієї енергії спектра зосереджено в смузі менше за 7 кГц. Згідно з аналізом впливу індикатриси відбиття випромінювання від поверхні воно підрозділяється на три види: дзеркальне, спрямовано розсіяне та дифузне. Відповідно поверхні розподіляються на наступні типи:

- ортотропні, у котрих індикатриси відбиття наближаються до напівсферичних;
- дзеркальні, котрі мають достатньо виражений максимум у напрямку дзеркального відбиття;
- змішані.

Таку класифікацію підстеляючих поверхонь можна вважати доцільною, оскільки для будь-якої поверхні характер індикатриси може сильно змінюватися зі зміною кута підходу ОЕП до поверхні.

У межах кутів підходу 80...50° тип індикатриси зберігається незмінним для всіх досліджених поверхонь

При більших значеннях кутів підходу тип поверхонь виявляється погано або навіть не виявляється зовсім, оскільки напрямки падаючого та дзеркально відбитого променів стають надто близькими.

При значеннях кутів підходу 50...40° форма індикатриси починає викривлятися, а найбільш сильне її викривлення відбувається при кутах підходу 20...10°.

Ортотропні характеристики для кутів підходу 80...65°, що відповідають ортотропній поверхні, дають індикатриси сферичної форми. Дзеркальні поверхні забезпечують відбиття для кутів 80...50°.

З урахуванням особливості зміни індикатриси розсіяння, належить відзначити, що для дифузно-відбиваючої поверхні флуктуації відбитого сигналу обумовлені, в основному, лінійним переміщенням ОЕП, а для поверхні з яскраво вираженою складовою – кутовим переміщенням відносно самої поверхні. Тому сигнал, відбитий від дифузних поверхонь, флуктує менш, ніж для поверхонь з яскраво вираженою дзеркальною складовою.

Система, яка побудована на основі амплітудної селекції робочої дальності, приймає рішення про вимірювальну дальність згідно відомій нерівності

$$U_c \leq a \sqrt{\bar{U}_{ш}^2},$$

де  $a$  – відношення сигнал/шум,  $\sqrt{\bar{U}_{ш}^2}$  – рівень власних шумів на вході граничного пристрою, і має великий (до 100%) розкид значень відстаней, вимірюваних ОЕП.

Останнє, в основному, визначається значним розкидом значень коефіцієнтів відбиття  $\rho$  підстеляючих поверхонь. Значення  $\rho$  для поверхонь, що часто зустрічаються, розрізняються більш, ніж у 10 разів, а з урахуванням кута підходу цей розкид зростає на 2 порядки.

Виходячи з закону зворотних квадратів, залежність вхідного потоку  $\Phi_{\text{вх}}$  від  $\rho$  і відстані  $l$  до неї має вигляд функції

$$\Phi_{\text{вх}} \approx f \frac{\rho}{l^2}. \quad (1.5.)$$

З формули (1.5) випливає, що має місце одночасний вплив на вхідний потік випромінювання зміни коефіцієнта відбиття поверхні та відстані до неї. Найбільш сильний вплив  $\rho$  виявляється при зондуванні твердих поверхонь у дальній зоні роботи ОЕП. Прирощення сигналу, пропорційне  $1/l^2$ , у цій зоні незначне, і основний внесок у спектр дає зміна коефіцієнта відбиття.

Вивчення заводової ситуації у відкритому оптичному каналі ОЕП показало, що найбільш істотними є світові перешкоди і спотворення сигналу, пов'язані з відбивними властивостями поверхні.

Таким чином, аналіз заводової ситуації у відкритому оптичному каналі довжиною до 5 м на засаді проведених теоретичних та експериментальних досліджень дозволяє вважати:

- впливом аерозольних атмосферних перешкод можливо нехтувати;
- прямого сонячного засвілювання потрібно уникати;

- світловий фон постійного і флюктуючого характеру необхідно враховувати з метою розробки відповідних методів завадозахисту;
- існує сильна залежність корисного сигналу від властивостей відбивної поверхні та кутів підходу до неї.

З використанням викладеного вище підходу розроблена системна модель ОЕП, яка створена з урахуванням заводої ситуації в атмосферному каналі та відбивних властивостей поверхні об'єкта зондування.

### **1.3. Шляхи інтелектуалізації та алгоритм роботи оптико-електронного перетворювача у режимі швидкісного руху**

Одним із шляхів інтелектуалізації роботи ОЕП є побудова його на основі використання інформації двох типів – апріорної та поточної, їх порівняння та прийняття рішення на базі гармонічного аналізу образів досліджуваних об'єктів.

Апріорні відомості про об'єкти різної фізичної природи, габаритів та конфігурації концентруються з використанням мікропроцесора в пристроях обробки інформації ОЕП.

У вигляді банку даних інформація придатна для зберігання та аналізу ситуації з відповідним управлінням алгоритмом роботи ОЕП у режимі інтелектуального аналізу. Порівняння поточної інформації, що одержується в процесі руху вимірювача, з апріорною, яка має координатну прив'язку, шляхом її перебору, дозволяє оцінити положення рухомого об'єкта.

Процес розпізнавання образів об'єктів складається з двох етапів. На першому етапі проводиться вимірювання параметрів еталонного образу об'єкта.

На другому етапі проводиться порівняння розпізнаваного образу з еталонним, за результатами якого можна судити про його приналежність до визначеного класу. Задача розпізнавання, таким чином, складається з вимірювання і порівняння образу, що спостерігається, з еталонним шляхом зіставлення їхніх параметрів-ознак.

Еталонний образ об'єкта локації формується за допомогою оптичного поля, наприклад, у вигляді набору інформації, що відповідає можливим положенням об'єкта в процесі руху в обраній системі координат. Якщо поточну інформацію, отриману в процесі руху, порівняти шляхом перебору з наявною еталонною, то по їхньому максимальному збігу можна судити про положення рухливого об'єкта.

Сукупність оцінок і відмінних ознак розпізнаваного об'єкта характеризує деяку точку в  $q$ -мірному просторі. Оцінки двох ознак  $x_1$  і  $x_2$  можуть трактуватися як координати точки на площині  $xOy$ .

Область можливих чи припустимих оцінок відмінних ознак утворить підпростір образу, що відноситься до одного класу. Сукупність інших значень оцінок утворить наступну область і т.д.

Найбільш частою формою оцінки ідентичності інформації є мінімум норми різниці вектора  $X$  і деякого вектора  $X^*$ , що характеризує еталонний образ. Якщо компоненти векторів безрозмірні, то користуються незваженою сумою квадратів різниці компонентів цих векторів:

$$\Delta X = (X - X^*)^T (X - X^*). \quad (1.6)$$

Вважається, що образ, що спостерігається, належить до  $i$ -го класу, якщо квадратична форма міри (1.6) для  $i$ -го еталона менше тієї ж величини для будь-якого іншого  $j$ -го



еталона. Метод мінімізації відстаней між векторами  $X$  і  $X_j^*$  полягає в тому, що образ, який характеризується набором ознак, належить до  $i$ -го класу, якщо  $X^T X_i^* > X^T X_j^*$ ,  $i \neq j$ .

Межі класів розмиті через вимірювання на фоні шумів і апіорної невизначеності оцінок класу. Тому результат розпізнавання носить імовірнісний характер. У якості міри збіжності еталонного та спостережуваного образів використовуються статистичні характеристики, із яких найбільш зручною є кореляційна функція між векторами, що характеризують кожний образ. Унаслідок цього як міру збіжності образу, що спостерігається, й еталонного доцільно використовувати кореляційні характеристики у вигляді кореляційної функції між векторами  $X$  і  $X^*$ , тобто  $V = \langle X^T X_i^* \rangle$ .

При спостереженні просторових  $s(x, y)$  і просторово-часових  $s(x, y, t)$  сигналів принципи розпізнавання виглядають таким чином. На площині спостереження  $xOy$  знаходять область, у якій функція інтенсивності подібна з деякою заздалегідь заданою функцією інтенсивності, названою еталонном. Критерієм подібності є квадратична форма міри (1.6), що зводиться до кореляційної функції  $\mu$  між образом, що спостерігається, й еталонним [11]:

$$\mu = s(x, y) s(x - \lambda_x, y - \lambda_y), \quad (1.7.)$$

де  $\lambda_x$  і  $\lambda_y$  визначають зсуви еталонного образу щодо приналежного тому ж класу образу на площині спостереження  $xOy$ .

Максимум функції  $\mu$  (1.7) відповідає повному сполученню цих образів, при якому  $\lambda_x, \lambda_y = 0$ . Але, оскільки переміщення еталона по площині спостереження контролюється, то і його положення в системі координат  $xOy$  завжди відомо. Таким чином, максимізація значення  $\mu$  дозволяє не тільки вирішити задачу розпізнавання, але і

вимірювати поточне положення образу на площині спостереження. У загальному випадку розпізнавання може проводитися за допомогою  $p$ -канального пристрою, у кожному каналі якого обчислюється умовна щільність імовірності події  $\omega_l$ , що відповідає присутності  $l$ -го сигналу ( $l = 1, 2, \dots, p$ ). Отримані в кожному каналі значення  $\omega(r/\omega_l)$  порівнюються з метою виявлення найбільшого й ухвалення рішення об  $l$ -ій події. Тому задача розпізнавання визначається знаходженням умов щільності імовірності  $\omega(r/\lambda_l, \omega_l)$ , названої також функціоналом правдоподібності. Під  $\lambda_l$  розуміється початкова виставка  $l$ -го еталона.

Таким чином, щільність імовірності  $\omega(r/\lambda_l, \omega_l)$  виступає в ролі апостеріорної щільності імовірності оцінки зсуву, що спостерігається,  $i$ -го сигналу, а пристрій, що розпізнає, являє собою  $p$ -канальний вимірник, у кожному каналі якого використовується свій  $l$ -ий еталон з початковою виставкою, обумовленою очікуваним положенням  $l$ -го сигналу на площині спостереження. Якщо  $l$ -й сигнал-образ присутній у спостереженні  $r(x, t)$ , то в  $l$ -м каналі виробляється оптимальна оцінка його положення.

Сполучення  $p$  фільтрів, що реалізують оптимальний нелінійний алгоритм обробки сигналу кореляційно-екстремального типу, дозволяє вирішувати задачу розпізнавання в такий спосіб. На вхід фільтра надходить вхідний сигнал спостереження  $r(x, t)$ , представлений своїми дискретними значеннями. У кожний вводиться еталонний сигнал також у дискретному представленні, положення якого визначається в початковий момент часу – апріорними відомостями, а потім – оцінкою, отриманою на попередньому кроці спостереження.

Якщо в  $l$ -м каналі формується найменше значення дисперсії  $\sigma_{il}^2$ , то у вхідному сигналі присутній образ того ж  $l$ -го класу, що й еталон.

При переході в пристроях, що розпізнають, до послідовного методу не обов'язкове використання  $p$ -канального вимірювання. Досить мати один канал, що реалізує аналогічні алгоритми, але послідовно порівнювати вхідний сигнал з  $p$  наявними еталонами.

Такий метод при спрощенні загальної схеми пристрою доцільно використовувати при малій кількості очікуваних сигналів-образів. У протилежному випадку процес потребує значного загального часу розпізнавання, який перевищує час розпізнавання  $p$ -канального пристрою приблизно в  $p$  разів.

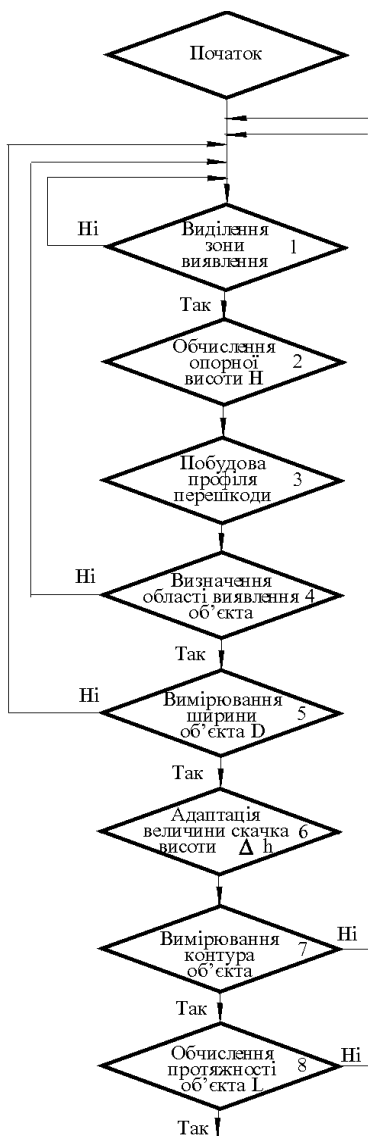
Об'єкти штучного походження, будучи продуктом технологічної діяльності, представлені набором простих геометричних форм, переважно з прямими краями. Кожен об'єкт характеризується сукупністю визначених ознак. Найбільш істотними з них є висота об'єкта, крутість зміни висоти, довжина, площа, коефіцієнт порізаності рельєфу. Дані ознаки покладені в основу класифікатора об'єктів у складі інтелектуального ОЕП.

Застосування зазначених ознак у режимі розпізнавання, заснованому на активному далекомірному методі з аналізом тривимірного зображення, дає можливість підвищити імовірність виявлення заданих об'єктів.

На підставі дослідження ступеня інформативності ознак об'єкта пропонується алгоритм обробки вхідної інформації, блок-схема якого дана на рисунку 1.1.

На першому етапі алгоритму здійснюється виділення зони виявлення, що утримує об'єкт.

Для цього виконується рядкове сканування відбиваючої поверхні по ширині зони виявлення й обчислення відстані між поточним і центральним положенням променя.



**Рисунок 1.1. Алгоритм обробки поточної інформації**

За умови влучення променя в зону виявлення фіксуються номери крайніх положень променя. На другому етапі обчислюється значення опорної висоти  $H$  між ОЕП і відбиваючою поверхнею по двох крайніх положеннях променя і куту нахилу поверхні сканування. Третій етап включає побудову профілю перешкоди шляхом обчислення висот  $h$  поточних точок щодо опорної висоти  $H$ . На четвертому етапі визначаються мінімальне і максимальне значення поточної висоти плоских перетинів, що характеризують об'єкт. Якщо поточна висота менш двох разів у рядку має значення, проміжне щодо екстремальних значень, тобто має стрибок висоти, об'єкт вважається виявленим. При цьому фіксуються положення променя,

що обмежують область виявлення, і максимальне значення висоти в рядку, що запам'ятовується. Якщо об'єкт не виявлений у потоковому рядку, відбувається перехід до першого етапу.

На п'ятому етапі виконується вимірювання ширини об'єкта  $D$  по рядку між положеннями променя, що фіксують область виявлення об'єкта, і перевірка умови перебування значення  $D$  між максимальним і мінімальним значеннями ширини об'єкта.

На шостому етапі здійснюється адаптація величини стрибка висоти, зафіксованого на четвертому етапі. Якщо стрибок висоти між 1-й і 2-й рядками менше заданої висоти, то виявлена частина об'єкта вважається плоскою і надалі виконується пошук стрибків тільки її висоти. Це дозволяє підвищити імовірність розпізнавання.

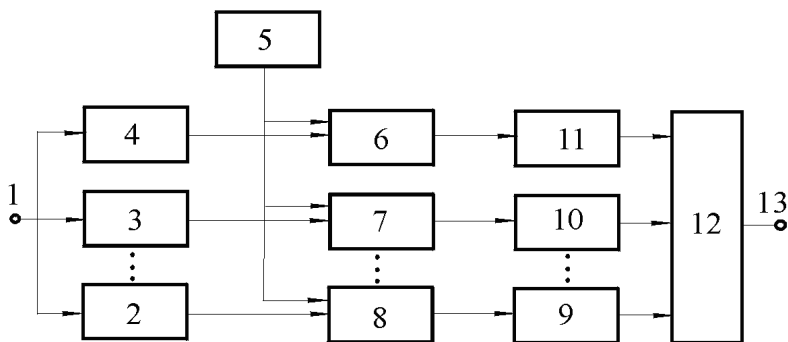
Сьомий етап алгоритму – перевірка умови наявності прямих на поверхні об'єкта. Для цього проводиться обчислення координат точок контуру об'єкта в 3-й рядку по визначеним на 4-м етапі координатам точок контуру об'єкта в 1-у і 2-у рядках.

У подальшому етапі з 1-го по 5-й виконуються для 3-го рядка і визначаються реальні значення координат точок об'єкта в 3-у рядку. Перевіряється виконання умови обмеження різниці між розрахунковим і реальним значеннями координат точок контуру похибкою вимірювання контуру об'єкта.

На восьмому етапі обчислюється довжина об'єкта  $L$  і перевіряється умова її розташування в діапазоні між мінімальним і максимальним значеннями. При виконанні умов 4-го, 5-го, 7-го і 8-го етапів фіксується наявність об'єкта, інакше – наявність перешкоди. Розрахункові і вимірювальні дані передаються на вхід класифікатора об'єктів, заснованого на використанні каналу апріорної інформації.

Для класифікації об'єктів на основі розрізнення геометричних чи інших відмінних ознак (сигнатур) об'єкта використаний метод, що базується на статистичній теорії рішень [12, 13].

Структура класифікатора об'єктів, показана на рисунку 1.2, використовує оптико-електронні вимірювання геометричних параметрів об'єкта, що послідовно обробляються в N паралельних каналах.



**Рисунок 1.2. Класифікатор об'єктів за правдоподібністю**  
**1 – дані вимірювань; 2, 3, 4 – об'єкти; 5 – бібліотека сигнатур; 6, 7,**  
**8 – розрахунковий ракурс; 9, 10, 11 – суматор; 12 – вибір**  
**найбільшого; 13 – рішення**

Кожний з N каналів відповідає одному з об'єктів, описуваних бібліотекою сигнатур. Бібліотечні дані повинні представляти об'єкт одиночним вектором у просторі ознак, положення якого однозначно залежить від форми і розмірів об'єкта.

Класифікація об'єкта здійснюється шляхом визначення мінімальної міри близькості між даними вимірюваннями і бібліотечними даними. Мірою близькості служить функція правдоподібності, що представляє функцію щільності імовірності. Класифікатор для кожного вимірювання обчислює M функцій правдоподібності і

вибирає об'єкт, що відповідає максимальній правдоподібності.

Такий підхід дає можливість повного синтезу алгоритму класифікації, оскільки здійснюються операції над вхідними даними без підстроювання і припасування невідомих параметрів з адаптацією правила рішення до переміщення об'єкта.

#### **1.4. Банк даних образів об'єктів зондування різної фізичної природи**

Застосування окремого ОЕП зазвичай спрямовано на виявлення та ідентифікацію об'єктів однієї визначеної природи.

Створено банк апіорних відомостей про об'єкти зосередженої, просторово-неоднорідної та енергетичної природи, які підлягають дистанційному контролю або зондуванню за допомогою ОЕП.

Інформаційні дані про об'єкти дослідження згруповані за принципом приналежності до однієї з трьох наведених типів.

Наведені як загальні джерела одержання необхідної інформації, так і конкретні приклади інформаційних пакетів, що дозволяють однозначно визначити об'єкт локації.

Для створення банку про об'єкти зосередженої природи використаний розроблений алгоритм розпізнавання об'єктів на базі аналізу геометричних форм, що досліджуються активним далекомірним методом за допомогою ОЕП ближньої дії.

Також ураховуються результати дослідження просторово-часових характеристик об'єктів, одержаних методом активного далекомірного розпізнавання за допомогою лазерного далекоміра [13, 14].

Дослідженню піддавались об'єкти техніки: вантажний автомобіль ГАЗ-37, літак ЯК-40, трактор ХТЗ, а також земні об'єкти (чагарники, листяні та хвойні дерева).

При проведенні досліджень використаний одноканальний прецизійний вимірювач профілю рельєфу, що забезпечує вимірювання похилої дальності, перерахування її у висоту об'єкта з відбиттям рельєфу поверхні.

Основні значення характеристик статистичних усереднень розподілів зведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Параметр	Автомобіль ГАЗ-37	Літак ЯК-40	Трактор ХТЗ	Сосна	Берега	Клен	Чагарник
Периметр $P$ , м	21	18	21	12,5	14	16,5	12
Площа $S$ , м	14	8,75	15	5,7	8,5	8,2	6,3
Середня висота $\bar{H}$ , м	2,7	2,4	2,5	2,5	3,5	2,5	1,1
Середнє квадратичне відхилення висоти $\sigma_H$	0,4	0,3	0,8	1,1	1,5	1,1	2,44
Середня крутість $\bar{S}_k$	5,56	5,35	4,1	6,6	7,8	6,8	3,2
Середня протяжність $\bar{B}$ м	4,0	5,6	5,8	3,5	4,0	3,4	3,3
Середнє квадратичне відхилення протяжності $\sigma_B$	0,9	4,6	1,6	1,5	2,1	2,6	2,2
Коефіцієнт форми $k$	31	37	29	27,4	23	33,2	22,8
Коефіцієнт порізаності $var = \bar{H} / \sigma_H$	7	8	31	2,3	2,3	2,3	2,5



Показано, що кожний об'єкт володіє індивідуальним набором ознак, таких як площа  $S$  перерізу на заданій висоті, коефіцієнт порізаності  $var$  по висоті, крутість зміни висоти об'єкта  $\overline{S}_n$  та інші. До вельми інформативних відзначних ознак технічних та природних об'єктів належить коефіцієнт порізаності поверхні  $var$ . Дані таблиці свідчать, що в об'єктів техніки коефіцієнт порізаності поверхні  $var > 7$ , а в природних утворень  $var < 3$ . Таким чином, одержані закономірності можуть бути покладені в основу класифікаторів об'єктів при створенні розпізнавальних пристроїв.

Для селекції природних поверхонь використані статистичні дані про спектральну залежність коефіцієнта відбиття ряду таких поверхонь, як ґрунти, водні поверхні, рослинні покрови [13]. Аналіз даних у спектральному діапазоні 0,5...1,0 мкм показав, що за величиною коефіцієнта відбиття і характером спектральної залежності природні поверхні діляться на дві групи.

В одній групі, до якої належать більшість ґрунтів, шляхових покриттів та рослинних покрів, спостерігається монотонне або стрибкоподібне зростання коефіцієнта відбиття із збільшенням довжини хвилі. Загальний діапазон зміни коефіцієнта відбиття для них складає 5...35 %.

В іншій групі, що складається із снігових покрів, коефіцієнт відбиття зменшується в межах 80...55 %. Визначені особливості спектральної залежності коефіцієнта відбиття придатні для розпізнавання природних поверхонь.

У таблиці 1.2 наведені усереднені значення яскравості  $L$  для різних поверхонь у спектральному діапазоні 0,5...1,0 мкм.

Таблиця 1.2

Поверхня	Яскравість L, відн. один.			
	Спектральний діапазон			
	$\Delta\lambda$ , мкм			
	0,5 ÷ 0,6	0,6 ÷ 0,7	0,8 ÷ 0,9	0,9 ÷ 1,0
Сніг з льодяною кіркою	<u>81,5</u>	<u>81,5</u>	74,0	69,0
Сніг вологий	<u>73,0</u>	<u>72,5</u>	63,0	55,5
Водна поверхня	<u>7,0</u>	<u>6,5</u>	2,0	1,5
Ґрунт вологий	5,0	8,0	17,5	<u>19,0</u>
Кукурудза силосна	5,5	4,0	32,0	<u>34,5</u>
Кукурудза зелена	7,0	6,0	8,0	<u>29,5</u>
Кукурудза жовта	11,5	14,0	3,0	<u>27,5</u>
Суданка	4,0	3,0	0,0	<u>50,5</u>
Чорнозем	4,5	6,0	0,0	<u>11,5</u>
Стерня злаків	10,0	15,5	8,5	<u>32,0</u>

Дані таблиці 1.2 свідчать, що принаймні половина з розглянутих природних поверхонь має максимальний розкид спектральної яскравості в двох спектральних діапазонах:  $0,6 \div 0,7$  та  $0,9 \div 1,0$  мкм.

В їх межах найбільше виявлені такі особливості коефіцієнта відбиття природних поверхонь, як спектральне положення максимуму та динаміка його величини.

За умови зондування досліджуваної поверхні двоспектральним зондуючим світловим потоком та порівняння відбитих сигналів з одиничним рівнем можливо визначення приналежності поверхні до однієї з установлених груп [13].

Перевищення сигналів в обох спектральних діапазонах одиничного рівня відповідає поверхні з більшим коефіцієнтом відбиття, віднесеної до 2-ої групи. Зворотнє співвідношення сигналів відповідає поверхні з

малим коефіцієнтом відбиття, що належить до 1-ої групи.

Таким чином, реалізується вимірювання коефіцієнта відбиття поверхні незалежно від дистанції до неї, що особливо важливо для вимірювань у динамічних умовах.

В оптичних вимірювальних системах статистичну структуру сигналів, відбитих від природних аерозольних середовищ, у тому числі для реальної хмарності, можливо одержати при безпосередніх випробуваннях конкретного зразка ОЕП.

Проте, у більшості випадків апріорні відомості про структуру перешкодового сигналу необхідні на ранніх стадіях проектування систем.

Автори провели визначення статистичних ознак відбитого сигналу з наявністю аерозольних перешкод [13,14].

В ОЕП відбивного типу можлива реєстрація деформованого частками аерозолі випромінювання в результаті його розсіювання в зворотному напрямку. Суть явища полягає в генерації випромінювачем короткого і спрямованого імпульсу випромінювання, що розсіюється в аерозольному середовищі.

За даними рисунка 1.3 зростання об'ємної концентрації аерозолі характеризується лінійним зростанням  $U_{\text{фд}}$ .

Наступні ділянки насичення і спаду  $U_{\text{фд}}$  обумовлено процесами коагуляції часток метеоутворень, що виражаються в уявному усередненні концентрації часток, і підвищенням частки поглинаючих процесів.

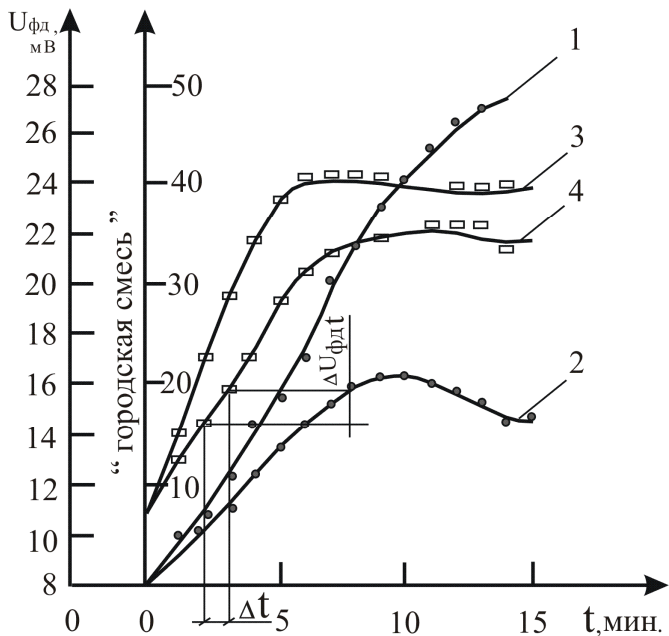


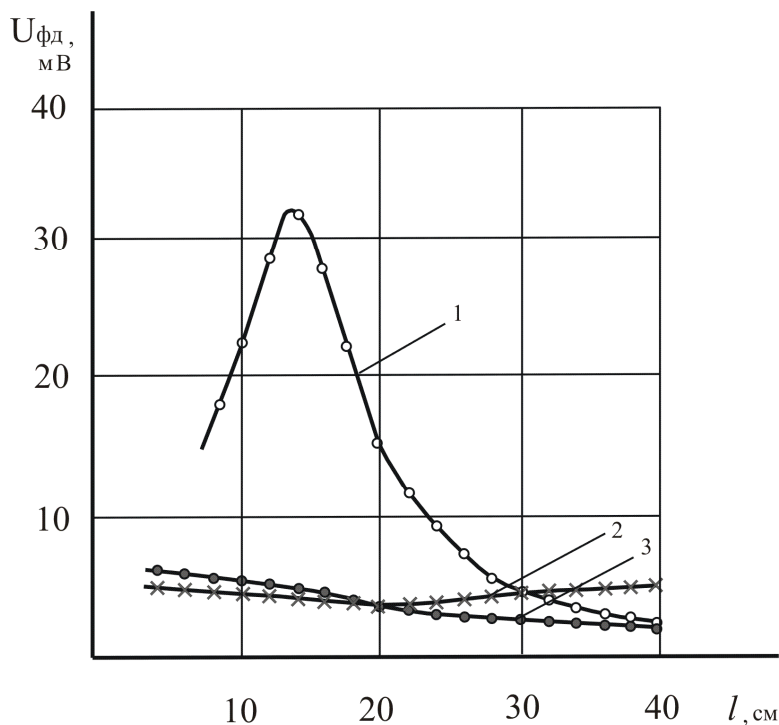
Рисунок 1.3. Залежності  $U_{fd}(t)$ :

1, 2 – дерево; 3, 4 – «міська суміш»; 1, 3 – тління (піроліз);  
2, 4 – горіння

Дослідження залежності амплітуди заводового сигналу від відстані до крайки хмарності показало, що чітку границю аерозолію пристрій не реєструє (рисунок 1.4).

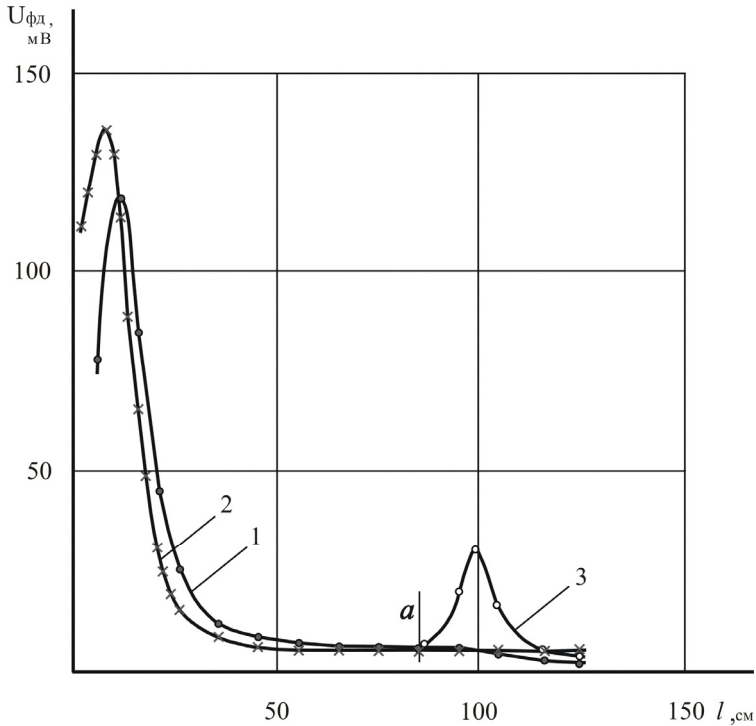
При малих значеннях коефіцієнта розсіювання крутість наростання сигналу, відбитого від зосередженої завади, вище (крива 1), ніж заводового від аерозолію (криві 2 – пара, 3 – дим).

Відбитий від аерозолію сигнал формується на відстані 3 м і для щільності  $0,05 \div 0,4 \text{ м}^{-1}$  містить екстремальну область при відстанях  $1 \div 1,5 \text{ м}$ .



**Рисунок 1.4.** Залежності амплітуди відбитого сигналу від відстані до крайки хмарності

Про характер залежності величини корисного сигналу фотоприймального пристрою від наявності аерозольних завад можна судити по виду експериментальних кривих на рисунку 1.5. Вони представляють дистанційні характеристики оптико-електронного блоку, що працює в задимленій атмосфері (крива 1) з координатою  $a$  границі утворення та у чистій атмосфері (крива 2). Очевидно, що аерозольна завада впливає як на амплітуду відбитого сигналу, так і на просторове положення його максимуму, що може послужити причиною помилкового спрацьовування пристрою.



**Рисунок 1.5. Дистанційні залежності корисного сигналу оптико-електронного блоку:**

**1 – у диму; 2 – у чистій атмосфері; 3 – від чорного екрана**

Крива 3, що представляє залежність сигналу, відбитого екраном з коефіцієнтом відбиття 0,05, підтверджує істотні розходження в характері відбиття світлових потоків аерозольними і безперервними завадами, як ознаки для їхнього розрізнення.

У другому напрямку визначалися глибини області аерозольних утворень, здатних сформувати сигнал граничного рівня. Висока чутливість приймача ( $\sim 10^{-8}$  Вт) визначає поріг спрацювання оптико-електронної системи, що відповідає оптичній щільності.

Приймальна оптична система розташовується поруч з випромінювачем і збирає розсіяне в зворотному напрямку випромінювання, що реєструється фотоприймачем.

Співвідношення між характеристиками розсіювання аерозолі і відбитим  $P(l)$  сигналом дається рівнянням, що має вигляд [13].

$$P(l) = \frac{E}{l^2} AT^2(l)\beta(l),$$

де  $l$  – довжина лінії зондування;

$T(l)$  – прозорість по лінії зондування між ОЕП й об'ємом, що розсіює;

$A$  – константа, обумовлена параметрами приймальної оптичної системи і фотоприймача, а також геометрією перетинання променів;

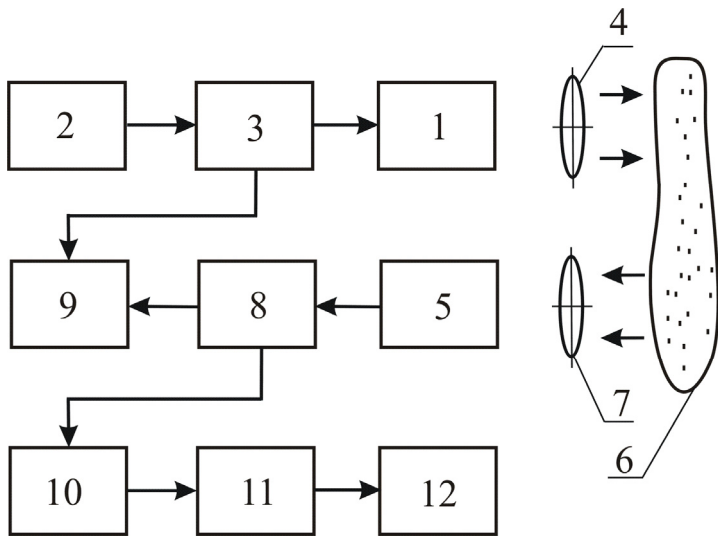
$\beta$  – коефіцієнт зворотного розсіювання;

$E$  – енергія випромінювання імпульсу.

Дослідження взаємодії зондувального оптичного імпульсу з водяними аерозолями і штучними димами проводилися в аерозольній камері [15, 34, 35]. У ній створювалися штучні дими й аерозолі з концентрацією часток у діапазоні від «чистої атмосфери» до щільних туманів і хмар, що не зустрічаються в природі, із щільністю від  $10^6 \text{ см}^{-3}$  до  $15 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$  відповідно.

Реальні тумани і хмари мають максимальну концентрацію часток  $(10 \div 12) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

У дослідженнях використовувався макет ОЕП, електрична схема якого (рисунок 1.6) побудована по 2-канальному принципу прийому-передачі.



**Рисунок 1.6.** Електрична схема ОЕП

Передавальний канал на GaAs-світлодіоді 1 живиться сигналом задавального генератора 2 з частотою повторення 4 кГц, що надходить через струмовий ключ 3, і формує оптичні імпульси тривалістю 50 нс. Імпульсне ІЧ-випромінювання транслюється через передавальний об'єктив 4 діаметром 16 мм із фокусною відстанню 40 мм і кутом розходження  $0,76^\circ$ .

Приймальний канал виконаний на базі Si-мікросхеми M72, що представляє собою фотодіод з каскадом посилення. Відбите від аерозолі 6 випромінювання світлодіода через приймальний об'єктив 7, що складається з лінзи діаметром 16 мм із фокусною відстанню 40 мм і полем зору  $1,6^\circ$ , надходить на приймач 5.

Сигнал фотовідповіді підсилюється на лінійному підсилювачі 8 і через стробуючий каскад 9, що забезпечує часову синхронізацію між передавальним і приймальним



каналами, надходить на компаратор 10. Компаратор 10 здійснює обмеження сигналу по амплітуді. Функцію завадозахисту виконує наступний часовий пристрій 11, що працює в режимі накопичення імпульсів відбитого сигналу. Кінцевий каскад приймального каналу складає виконавчий пристрій 12, що формує електричний, акустичний чи світловий сигнал. Базова відстань між оптичними вісями приймальної і передавальної систем складає 100 мм.

Аналіз результатів дослідження сигналу, відбитого аерозолем, показав, що амплітуда відбитого сигналу флюктує у часі з частотою 0,5–10 Гц. У даному випадку найбільш близькою представляється модель взаємодії сигналів з аерозольним середовищем, що враховує вплив на процеси розсіювання флюктуації динамічних параметрів середовища (щільність, коефіцієнт розсіювання і його градієнт). Отримані з експериментальних досліджень дані по відбиттю оптичного сигналу від аерозольних утворень дозволяють побудувати електронний захист оптико-електронного блоку навігаційної системи від перешкод, зв'язаних зі зворотним розсіюванням.

Для побудови захисту використовуються флюктуації амплітуди відбитого сигналу, пов'язані з рухом. Для цього в електронний блок обробки навігаційної системи вводиться дискримінатор амплітуди імпульсів. Обробка імпульсу здійснюється методом пропускання одиночного сигналу через оптимальний фільтр з аналізом послідовності сигналів по імовірності появи їх у заданому часовому інтервалі [15, 16].

Виявлення сигналів реалізується за допомогою суматорів методом нагромадження як однієї з форм оптимальної фільтрації для адитивної суміші сигналу і перешкоди. Для зниження вихідного відношення сигнал-перешкода вводиться нормування по амплітуді, чим

підвищується перешкодозахист до одиночних викидів, що значно перевищують корисний сигнал. При швидкостях до 30 м/с і глибини відбиттів аерозоллю 1000–1500 мм, що існує в реальній атмосфері, частота флуктуацій амплітуди відбитого сигналу досягає 2,5–5 кГц. Відповідно період осциляцій амплітуди буде складати 0,4–0,2 мс.

У створеному макеті оптико-електронного блоку час нагромадження 5 імпульсів складає 0,2 мс. При відбитті від аерозоллю, а не від поверхні, за час 0,2 мс хоча б один із заданого числа імпульсів не буде відповідати амплітуді, заданої дискримінатором [17, 18]. При цьому в накопичувальному лічильнику не вистачить одного імпульсу, лічильник скинеться в початковий стан і заблокує подальшу обробку сигналу. Така система пропонується для захисту оптико-електронних блоків навігаційних пристроїв від перешкоди зворотного розсіювання, обумовленого аерозолями і димами.

Статистичні характеристики заводового сигналу однозначно визначаються імовірністю появи різних градацій хмарності. Результати дослідження градацій для таких типів хмарності як дощові, купчасті, шарувато-купчасті та шаруваті в залежності від розподілення коефіцієнтів відбиття, розсіяння та його градієнта надаються у вигляді гістограм.

Із аналізу гістограм випливає, що найбільш однорідні дощові хмари. Для шаруватих та шарувато-купчастих хмар характерна найбільша мінливість коефіцієнта відбиття. Найбільшою прозорістю володіють шарові хмари, а найменшою – дощові.

Апріорна інформація про фізичний стан об'єктів просторово-неоднорідної природи, тобто атмосферу та її утворення, включає також дані про функції пропускання та коефіцієнти поглинання. Для розрахунків функції пропускання і коефіцієнта поглинання використано дані

про параметри ліній молекулярних компонент атмосфери та висотні профілі метеорологічних параметрів [19, 20].

В основу банку даних для розрахунку коефіцієнта поглинання покладається атлас спектральних ліній, із котрого проводиться вибірка параметрів необхідних ліній, яка складає банк спектроскопічних даних [20, 21].

Використання різних явищ взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою забезпечує принципову можливість лазерного зондування практично будь-якого її параметра: температури, тиску, щільності, вітру, вологості, аерозолів (хмари, тумани, димки та інше), оптичних параметрів та мікрофізичних характеристик.

Для одержання інформації про атмосферні параметри та їх розподіл у часі та просторі необхідно було насамперед вирішити пряму задачу оптики атмосфери – дослідити вплив атмосфери на лазерний промінь із заданими характеристиками. Розшифрування ехо-сигналів забезпечує відновлення характеристик атмосфери, тобто дозволяє вирішити зворотну задачу оптики атмосфери [22].

Об'єкти енергетичної природи, що підлягають визначенню, уявляють собою джерела випромінювання штучного або природного походження. До природних випромінювачів, що є температурними джерелами, належать небесні світила, небо, хмари та поверхня Землі. Відносно приймальної оптичної частини ОЕП природні випромінювачі розділяються на точкові, фонові та бокові. Основні фізичні властивості природних джерел випромінювання – спектральні, енергетичні і частково просторові характеристики, достатньо добре вивчені та надаються в численних публікаціях [20–22].

Для оцінки джерела випромінювання штучного походження також необхідні основні статистичні характеристики його випромінювання: математичне очікування, дисперсію, спектральну щільність потужності.

Недостатня кількість даних про характеристики багатьох джерел випромінювання утруднює задачу їх достовірного опису. До теперішнього часу накопичений достатньо великий матеріал по апріорно відомим оптичним діапазнам роботи штучних випромінювачів, тобто їх спектральним характеристиках, але немає даних про статистичні властивості цих характеристик як випадкових функцій [20].

Фотометричні характеристики джерел випромінювання приймають цілком детермінованими і відповідними деяким стаціонарним моделям випромінювачів. У якості основних фотометричних параметрів приймаються: для точкових випромінювачів – сила випромінювання, а для джерел, що мають кінцеву площу випромінювання, – поверхнева щільність випромінювання або яскравість.

З літературних джерел можливо одержати інформацію, наприклад, про силу випромінювання нагрітих частин літака, оптичний спектральний діапазон роботи ОЕП об'єкта локації, закони модуляції випромінювання джерел [22–24].

### **1.5. Комп'ютерне моделювання оптичного каналу та схем оптико-електронного перетворювача**

Розроблена комп'ютерна модель оптичного каналу з урахуванням завадової ситуації та властивостей поверхні відбиття засобами моделей електронних компонент. Для автоматизації процесів аналізу і підвищення достовірності розрахунків різних компонентів ОЕП пропонується використання розвиненого середовища математичного моделювання потужних пакетів проектування електронних систем Inventor та OrCAD.9.1 [25, 26].

В результаті реалізується можливість ефективного пошуку оптимальних параметрів оптичних каналів на основі фізичного споріднення процесів поширення електромагнітних хвиль оптичного та радіодіапазонів. При цьому процес поширення світла в просторі моделюється за допомогою поширення радіосигналу в лінії передачі. Модель оптичного каналу дозволила провести дослідження різних варіантів принципів і структурних схем ОЕП, оцінку оптоелектронних компонентів, оптичних вузлів, середовища і завадових впливів (шумових, регулярних імпульсних), а також поведінку вимірника в динамічному режимі [27–28].

Традиційно для розрахунків параметрів оптичних каналів застосовується ряд аналітичних закономірностей, відомих із фундаментальних робіт у галузі оптико-електронного приладобудування [24]. Такі розрахунки обов'язкові при виборі:

- оптоелектронних приладів;
- радіоелектронних компонентів функціональних блоків розроблюваних пристроїв;
- параметрів розроблюваних систем;
- оптичних приладів (лінз, фотофільтрів.).

Фізична суть цих закономірностей – опис поширення світла від випромінювача до відбивної поверхні і далі до фотоприймача, або безпосередньо від випромінювача до фотоприймача в конкретному середовищі. Основний інтерес представляють енергетичні співвідношення величин на вході та виході оптичного каналу.

В основу моделі встановлюється використання електричної лінії затримки без втрат, що забезпечує часові співвідношення, еквівалентні оптичному поширенню. При цьому характеристики оптичного випромінювання ставляться у відповідність електричним сигналам у лінії затримки.

Амплітудні співвідношення забезпечуються реалізацією в моделі основної формули оптичної далекометрії:

$$I_{\text{фп}} = \tau_a \tau_c \rho k I_{\text{вип}} D_{\text{вип}}^2 A_{\text{вх}} S_{\text{фп}} / A_{\text{вип}} \Omega \pi \ell, ^2$$

Вхідні дані для моделі оптичного каналу:

$\ell$  – дистанція, що вимірюється (м);

$\tau_c$  – показник ослаблення середовища (б/р);

$\tau_a$  – коефіцієнт ослаблення оптичних систем передавача і приймача (б/р);

$\rho$  – коефіцієнт відбиття (б/р);

$D_{\text{вип}}$  – діаметр оптичної системи випромінювача (м);

$A_{\text{вх}}$  – площа оптичної системи приймача (м<sup>2</sup>);

$k$  – ефективність випромінювача (Вт/А);

$\Omega$  – тілесний кут випромінювання (по ДС) (стерад);

$A_{\text{вип}}$  – площа тіла свічення випромінювача (м<sup>2</sup>);

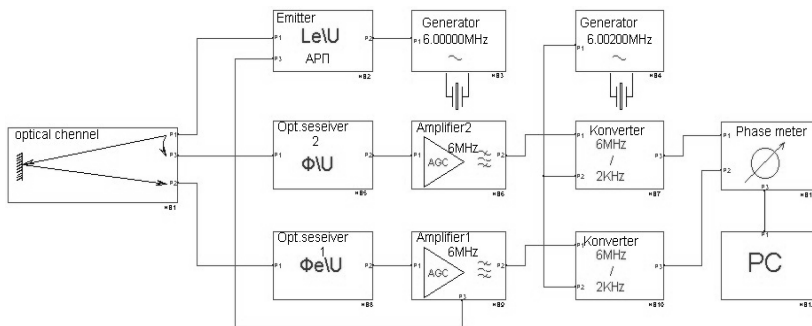
$S_{\text{фп}}$  – інтегральна чутливість фотоприймача (А/Вт);

вольт-амперна характеристика випромінювача - (програма Parts);

характеристика зворотного відновлення випромінювача - (програма Parts пакету Design Lab).

Модель оптичного каналу представляється у виді радіоелектронної схеми в стандартному проекті одного із пакетів проектування електронних пристроїв [25]. Конкретний оптичний канал у цьому випадку може бути вбудований в електронну схему розроблюваної системи (рисунок 1.7).

Комп'ютерна модель оптичного каналу представляється у вигляді незмінної електронної схеми (підсхеми, загальної для множини варіантів реалізації) та списку параметрів, конкретного для кожного випадку. Дія оптичних завод і шумів визначається за допомогою відповідних генераторів сигналів.



**Рисунок 1.7. Приклад включення моделі оптичного каналу в структурну схему вимірювача дистанції**

Величини яскравості  $I$  випромінювача і вхідного світлового потоку фотоприймача  $\Phi_{\text{фп}}$  характеризують поширення світлової енергії та моделюються відповідними напругами.

Просторові, фізичні та геометричні параметри оптичного каналу та його компонентів вводяться в аналітичному вигляді як параметри чотириполусників на вході та виході лінії передачі і як власно параметри лінії передачі [25].

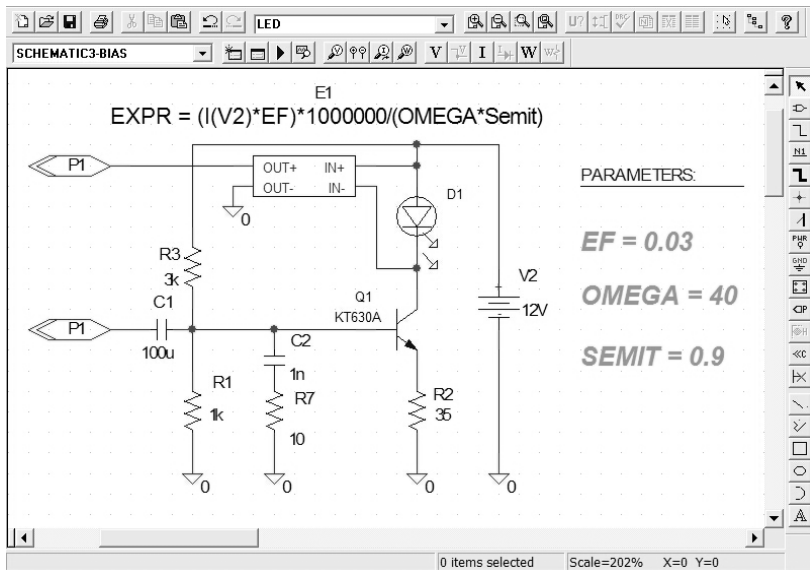
Модель оптичного каналу в наведеному прикладі, що показана на рисунку 1.7, розосереджена у трьох елементах:

- випромінювачі ( рисунок 1.8),
- фотоприймачі,
- власно оптичному каналі ( рисунок 1.9).

Величина напруги на виході випромінювача чисельно дорівнює величині  $I$ , а на вході приймача –  $\Phi_{\text{фп}}$ .

Урахування впливу паразитних каналів проходження випробувальних сигналів здійснюється за допомогою додаткової лінії затримки  $T_2$ , що показана на рисунку 1.8.

Можливо вводити різні емпіричні та аналітичні залежності для опису проходження світла через паразитний канал.



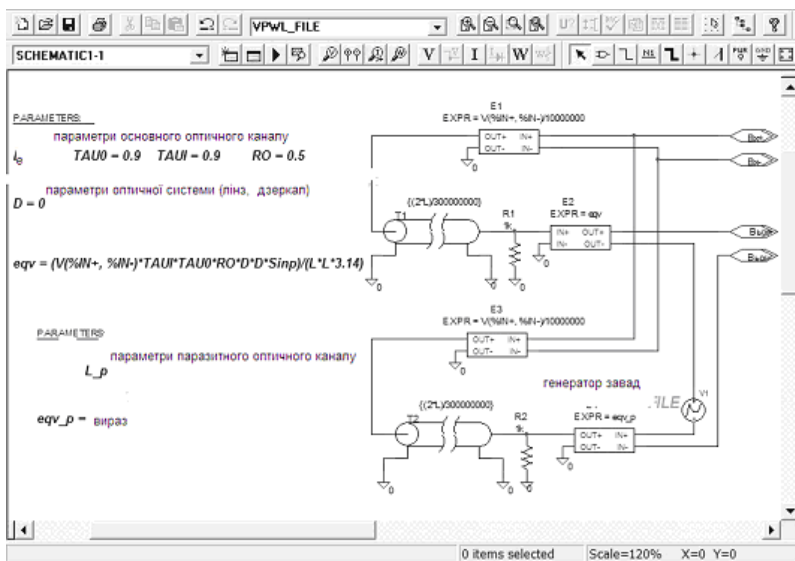
**Рисунок 1.8. Підсхема оптичного випромінювача**

На рисунку 1.9. показана підсхема оптичного каналу.

Для урахування задової ситуації та властивостей поверхні відбиття використана розроблена узагальнена системна модель дальномірного ОЕП як оптико-електронної інформаційної системи (рисунок 1.10).

Згідно з нею інформаційний оптичний сигнал переміщується від випромінювача ОЕП до його приймальної апертури крізь випадково неоднорідне середовище атмосферного каналу зв'язку “середовище–поверхня–середовище” в умовах аерозольних і електромагнітних перешкод та впливу відбивних властивостей поверхні об'єкта зондування [28–33].





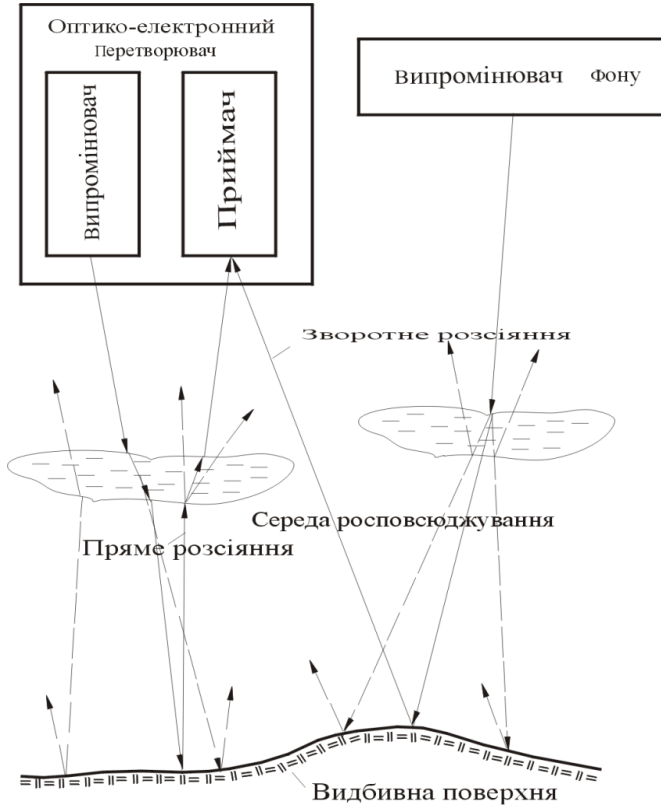
**Рисунок 1.9. Підсхема оптичного каналу**

Модель оптичного каналу випробувана і показала високий ступінь відповідності розрахункових та одержаних експериментальних даних.

Подальший розвиток моделі проведено в таких напрямках:

- Урахування впливу типу аерозольних утворень у середовищі поширення світлового променя [39, 40].
- Розвиток наявної моделі в динамічну модель оптичного каналу, котра буде відображати процеси оптичної локації в умовах взаємного руху випромінювача, приймача та відбивача оптичного сигналу.

Проведено комп'ютерне моделювання блок-схеми ОЕП, що здійснює прямолінійний фазовий метод вимірювання дальності.



**Рисунок 1.10.** Узагальнена системна модель далекомірного ОЕП

Переваги розробленого методу:

- принципова можливість досягти високої точності вимірювань з поліпшенням якісних характеристик функціональних вузлів;
- прямолічильність методу дозволяє рекомендувати його для розробок високотехнологічних конструкцій вимірників дальності;
- не вимагає складних процедур вимірювання градуовальних характеристик.

Метод передбачає наявність двох ідентичних каналів понижувального конвертування частоти. Один з них включає реальний оптичний канал, другий – опорний. Обидва канали збуджуються від одного генератора високої частоти 8 МГц.

Обидва понижувальних конвертора використовують єдиний гетеродин з частотою 8.002 МГц. На виході понижувальних конверторів присутні синусоїдальні сигнали з різницевою частотою 2 кГц. Різниця цих сигналів лінійно пов'язана з відстанню, що вимірюється.

Моделювання роботи блок-схеми проведене в наступній послідовності:

- Створення графічного зображення схеми.
- Створення моделі оптичного каналу засобами моделей електронних компонент.
- Проведення моделювання та аналіз результатів (графіків процесів).
- Оптимізація параметрів структурної схеми.
- Повторне моделювання (декілька ітерацій).
- Кінцева структурна схема вимірника в символах Design Lab 8.0.

Моделювання ОЕП проведене шляхом послідовного синтезу принципів електричних схем і конструкції окремих вузлів.

Заміна абстрактного представлення функціональних вузлів структурної схеми схемними вузлами, що практично реалізуються, проведена з обов'язковою перевіркою кожної незначної зміни. Такий підхід дав можливість відстежувати джерела небажаних явищ у роботі ОЕП.

Вибір джерела та приймача випромінювання проведено з урахуванням узгодження їх за частотно-часовими, спектрально-енергетичними та оптико-геометричними характеристиками [31]. Першочерговим

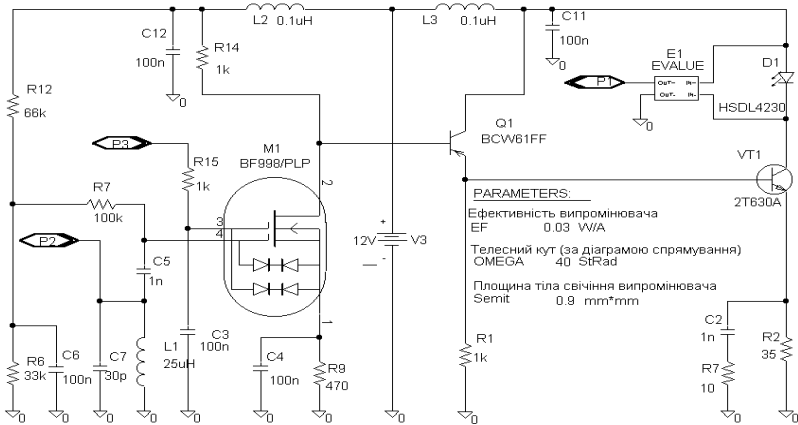
етапом оптимізації швидкісних параметрів ОЕП є узгодження таких параметрів, як частота модуляції, постійна часу елементів та всього пристрою, смуга пропускання частот. Вивчення сучасного ринку оптоелектроніки дозволило оцінити прогностні метрологічні характеристики вимірювача.

Проаналізовано оптико-електронні компоненти провідних фірм-виробників. У якості випромінювача вибрано GaAs-світлодіод SFH 495 P фірми Simens, а ФП – Si-фотодіод рін-структури BPV-10F фірми Temic. Характеристики елементів, згруповані у відповідності з основними вимогами, наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Характеристики	Тип та марка оптико-електронного елемента	
	GaAs-світлодіод SFH 495 P	Si-фотодіод рін-структури BPV-10F
Спектрально-енергетичні	Максимум випромінювання $\lambda_{\max} - 940$ нм Смуга пропускання $\Delta \lambda - 4$ нм Повний випромінюваний потік $\Phi_e - 700$ мУТ	Максимум чутливості $\lambda_{\max} - 950$ нм Струмова чутливість - 60 мкА (щільність потоку 1 мВт/см <sup>2</sup> )
Оптико-геометричні	Ширина діаграми спрямованості – $\pm 30^\circ$	Ширина діаграми спрямованості $\varphi - \pm 17,5^\circ$ Площа фоточутливої поверхні $\varphi - 0,78$ мм <sup>2</sup>
Частотно-часові	Час перемикання $t_f - 7$ нс	Швидкодія $t_f - 2,5$ нс

На рисунку 1.11 наведена принципова схема оптичного випромінювача.



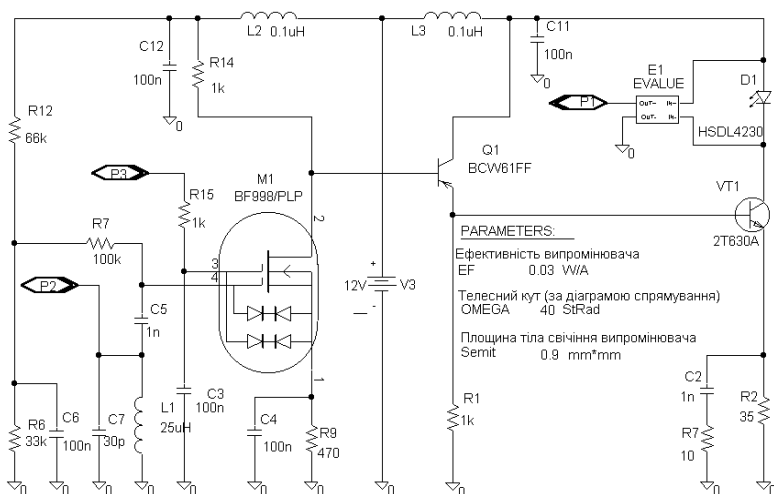
**Рисунок 1.11. Схема оптичного випромінювача**

Оптичний випромінювач D7 працює в лінійному режимі з постійним струмом 50 мА. Цей струм задається струмостабілізуючим резистором R2, включеним в емітерний ланцюг транзистора VT1.

Підбором елементів схеми досягнуто максимального розмаху змінної складової струму через випромінювач D7 при умові роботи на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики.

Аналіз показав високу міру лінійності (відсутність значних гармонічних спотворень) у формі модуляції оптичного променя. Амплітуда відповідного максимуму синусоїдального сигналу струму через випромінювач заданється резистором R7. У схему випромінювача включений каскад регулювання рівня сигналу на двозатворному польовому транзисторі M1 для організації петлі автоматичного регулювання посилення (АРП), що охоплює весь високочастотний тракт ОЕП.

У структурі вимірника є два ідентичних підсилювачі сигналів оптичних приймачів. Від міри ідентичності їх конструкційної реалізації залежить точність вимірювання. Передбачається ідентичність їх фазочастотних характеристик, а також характеристик залежності фазової характеристики від температури, напруги живлення, напруги управління. Підсилювачі будуються по двоконтурній резонансній схемі (рисунку 1.12) на базі малoshумного двозатворного польового транзистора M1

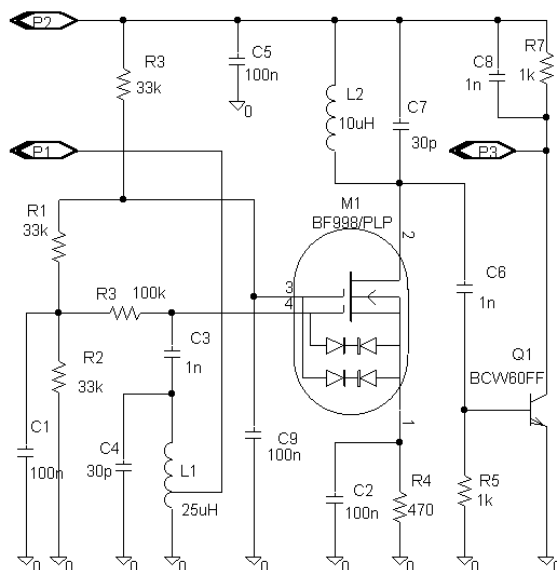


**Рисунок 1.12. Схеми резонансного підсилювача з детектором рівня (HB9 за блок-схемою рисунку 1.11)**

Вхідний і вихідний контури підсилювача настроюються на частоту сигналу модуляції оптичного сигналу, завдяки чому досягається нульовий фазовий зсув. Фотоприймач включається безпосередньо у вхідний контур підсилювача, що робить структуру нечутливою до низькочастотних і постійних завадових засвітлювань, оскільки вхід підсилювача зашунтовано індуктивністю

вхідного контуру  $L3$ . Вихідний сигнал підсилювача знімається за допомогою індуктивного зв'язку з вихідного контуру, що полегшує узгодження з навантаженням.

Для стабілізації рівня сигналу, що приймається оптичним приймачем, у структуру ОЕП введений контур АКП. Регулювання рівня випромінювання здійснюється управлінням по іншому затвору транзистора М1 блоку оптичного випромінювача. Необхідність введення контуру АКП обумовлена вельми широким динамічним діапазоном ( $\approx 85$  дБ) сигналу, що знімається з оптичного приймача в разі відсутності такої стабілізації. Як детектор рівня сигналу використовується пристрій НВ1, схема якого описується далі. На рис. 1.13 представлений детектор рівня сигналу оптичного каналу, який є основою системи.



**Рисунок 1.13.** Схема детектора автоматичного керування підсиленням (АКП) (НВ1 за схемою рисунку 1.11)

До детектора рівня пред'являлися вимоги високого вхідного опору, щоб виключити вплив на ланцюги, що аналізуються (вихідний контур підсилювача).

Другою особливістю детектора рівня є пороговий характер його роботи.

Регулювання посилення починається після досягнення сигналом граничного рівня. Пороговою напругою є природна напруга відкриття детектуючого транзистора VT1, який працює в режимі без постійного зміщення.

Конвертори частоти не мають принципових особливостей. Обидва конвертори частоти повинні мати ідентичну конструкцію для виключення впливу паразитних електричних параметрів.

Вимірник фазового зсуву побудований за принципом вимірювання частини періодів, що перекриваються, двох сигналів різницевої частоти.

Для усунення впливу нестабільності частот опорного і основного генераторів крім того вимірюється і весь період різницевої частоти.

Вимірювання періодів здійснюється методом підрахунку імпульсів еталонної частоти за період часу, що вимірюється.

Вимірювані періоди фіксуються по переходу різницевих сигналів через нульове значення напруги за допомогою компараторів напруги НВ1 і НВ2.

Фазовий зсув, відповідний певній дистанції, обчислюється в ЕОМ по двох введених числах як:

$$\Delta\varphi = (1 - \Delta T_{\text{п}} / \Delta T) \cdot 2\pi,$$

де  $\Delta T_{\text{п}}$  – частини, що перекриваються, періодів сигналів;  
 $\Delta T$  – період різницевої частоти одного з сигналів.



Дистанція обчислюється з виміряного значення фазового зсуву. На індикатор можна виводити значення лічильника періодів, що перекриваються, і отримати прямолінійний вимірник дистанції.

Підбором опорної рахункової частоти добиваються цілого значення ваги одного розряду показання індикатора в одиницях довжини.

Використання комп'ютерного пакету програм Design Lab 8.0 при моделюванні складових вузлів принципової схеми ОЕП дозволяє всебічно проаналізувати режими роботи схем по постійному струму, отримати пакети динамічних характеристик при проходженні змінних сигналів, підібрати для отримання необхідних вихідних і прохідних параметрів вузлів оптимальні номінали вхідних елементів.

## **1.6. Експериментальні дослідження ОЕП у статичному і динамічному режимах**

Найбільш інформативними характеристиками, що описують якісні властивості розробленого ОЕП, вважаються його дистанційні характеристики, виміряні при різних умовах експерименту.

Під дистанційною характеристикою розуміється залежність основного інформативного сигналу на виході структурної схеми вимірника від дистанції.

Основним інформативним сигналом у внутрішньому уявленні ЕОМ є числова величина. Вона представляється оператору у вигляді чотиризначного числа з фіксованою точкою, чисельно рівного фазовому зсуву між вимірювальним і опорним сигналами. Точність числової величини визначається методом вимірювання і його апаратною реалізацією.

Конструкція ОЕП зазнає впливу зовнішніх перешкод і власних шумів, тому основний інформативний сигнал у загальному випадку є випадковою величиною і винний представлятися відповідними величинами: математичним очікуванням і дисперсією. Вимірювальна програма представляє таку можливість метрологу. Крім того, значення дисперсії основного інформативного сигналу може використовуватися для оцінки точності вимірювань у різних умовах. Основний інформативний сигнал ЕОМ ставиться у відповідність вихідному значенню дистанції, тобто результату вимірювання.

Ця відповідність однозначна для конкретного режиму роботи вимірника, тому представлення дистанційних характеристик основного інформативного сигналу, нормованого до своєї максимальної величини ( $108^\circ$ ), не знижує наочності і достовірності випробувань.

Дистанційні характеристики вимірювалися при різних параметрах, що характеризують умови експерименту, а саме:

- рівень освітленості поверхні об'єкта;
- температура;
- час після включення напруги живлення ОЕП;
- коефіцієнт відбиття об'єкта;
- напруга живлення ОЕП.

Вимірювання характеристик проведене по циклічному алгоритму:

1. На статичній установці встановлюється мінімальне значення дистанції 10 см. Задається крок вимірювання дистанційної характеристики  $\Delta \ell$ .

2. Встановлюються (або заміряються) умови експерименту.

3. Проводиться  $N$  вимірювань (процес автоматизований) величини основного інформативного сигналу (фазового зсуву).

4. Обчислюються і фіксуються значення  $m_1$  математичного очікування і  $\delta$  дисперсії для даного значення дистанції. Значення  $N$  (кількість вимірювань) – постійний параметр всього процесу вимірювання дистанційної характеристики.

5. На установці встановлюється значення дистанції більше попереднього на величину  $\Delta \ell$ .

6. Якщо діапазон дистанції не вибраний, то здійснюється перехід до 3 пункту даного алгоритму. Якщо діапазон дистанції вибраний – кінець алгоритму вимірювання дистанційної характеристики.

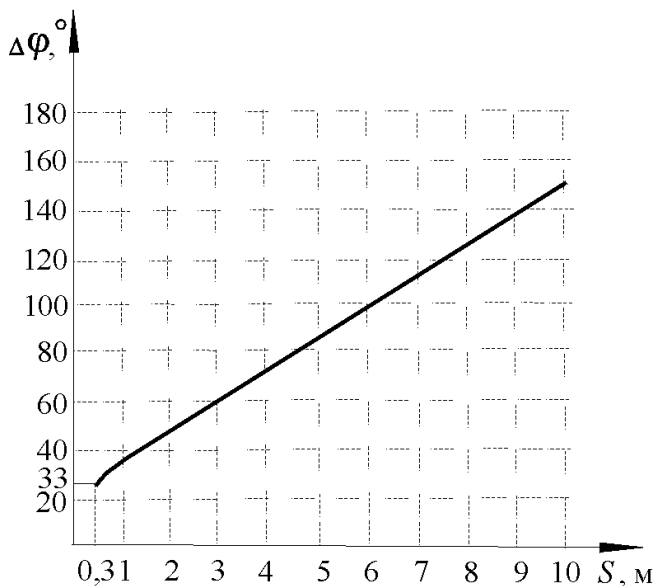
Технічні характеристики розробленого та створеного ОЕП приведені в таблиці 1.4

Таблиця 1.4

Фактор	Характеристика
Джерело оптичного випромінювання	GaAs-лазерний діод
Вид модуляції	Амплітудна
Частота модуляції (основна)	7,5 МГц
Фотоприймач	Si-pin-фотодиод
Довжина вимірюваних відстаней	
$S_{\min}$	0,3 м
$S_{\max}$	10,0 м
Відносна точність вимірювань	$\pm 1,0 \%$
Максимальна швидкість переміщення, при якій досягається точність вимірювань	20 м/с
Час вимірювань одним прийомом	0,15 мс
Маса	230 г
Габарити	$\varnothing = 60$ мм, $h = 100$ мм
Споживана потужність	1,5 Вт
Діапазон робочих температур	-20...+85 <sup>оc</sup>

Отримані характеристики нормуються до максимального значення фазового зсуву  $108^\circ$ . Таким чином формується сімейство дистанційних характеристик (математичних очікувань і дисперсій), що являють собою всебічний опис можливостей і недоліків ОЕП на основі прямолінійного фазового методу у варіанті конструктивного виконання [31].

Визначення дистанції в ОЕП проведено з використанням градуовальної характеристики. Експериментально виміряна градуовальна характеристика ОЕП, що має вид  $\Delta\varphi = f(S)$  (рисунок 1.14), являє собою залежність вихідного інформаційного сигналу  $\Delta\varphi$  (фазового зсуву) від контрольованого вхідного значення дистанції  $S$ .



**Рисунок 1.14.** Градуовальна характеристика ОЕП

Алгоритм вимірювання  $\Delta\phi$  включає не тільки вимір абсолютної величини часового інтервалу  $t$ , що відповідає зсуву фази, а і тривалості періоду  $T$ . Вимірювальний період  $T$  включає позитивний і негативний перепади синусоїдального сигналу в схемі ОЕП. При цьому показником відстані є не абсолютна величина  $t$ , а її відношення до довжини  $T$ . Це дозволило підвищити нестабільність частоти кварцових генераторів до рівня  $10^{-9}$ , що виключило необхідність їх термостатування.

Аналіз градуовальної характеристики показав, що відхилення від лінійності у бік менших значень з'являються поблизу меж діапазону вимірюваних відстаней. Точність вимірювань чи дисперсія погіршується на ділянках нелінійності 0,3...0,5 м і більш 4,5 м, але не перевищує 1 %.

Причинами виникнення нелінійних ділянок є як зовнішні умови у вигляді змін коефіцієнта відбиття поверхні об'єкта, так і внутрішні наведення від випромінювального блоку. Зменшення значення дисперсії досягнуто збільшенням потужності локаційного оптичного сигналу й екрануванням підсилювача потужності в блоці випромінювача.

Аналіз отриманих дистанційних характеристик після серії експериментів полягав в оцінці:

- лінійності дистанційних характеристик і характерних точок і дільниць на них ;
- діапазону зміни фазового зсуву на вимірювальній дистанції;
- впливу умов експерименту на відмінності в дистанційних характеристиках;
- величини дисперсії вимірювального сигналу на різних дільницях дистанції та при різних умовах експериментів.

На основі проведеної оцінки зроблено висновки:

- дистанційні характеристики відхиляються від ідеальної прямої в бік менших значень у околі значень більше за 4,5 м та дуже малих значень;

- загин дистанційних характеристик униз збільшується із зменшенням коефіцієнта відбиття поверхні об'єкта;
- дисперсія (точність, обмежена шумами і перешкодами) збільшується із збільшенням дистанції та при дуже малих значеннях дистанції (менше 0,2 м).

Залежність форми дистанційних характеристик від коефіцієнта відбиття з'являється у наслідок попадання в канал прийому сигналу електромагнітного наведення від підсилювача потужності оптичного випромінювача. Вплив цього сигналу тим більше, чим слабше рівень сигналу, що приймається.

Поліпшення характеристик ОЕП залежить від елементів електромагнітного екрана. Підвищення потужності оптичного локаційного сигналу також може зменшити значення дисперсії на великих і дуже малих значеннях дистанції.

## **Основні результати і висновки до розділу 1**

Отримано методичні вирішення проблеми дистанційного визначення координат і параметрів об'єктів у просторовій зоні за допомогою ОЕП.

Створено банк апріорних відомостей про об'єкти різної фізичної природи, який дозволяє однозначно визначати групову приналежність об'єкта локації (зосередженої, просторово-неоднорідної та енергетичної природи), індивідуальні ознаки за спектральними, енергетичними і просторовими характеристиками, що піддаються дистанційному контролю ОЕП.

Запропонована структура класифікатора об'єктів, що використовує вимірювані ознаки (сигнатури) об'єкта та апріорну інформацію (бібліотеку сигнатур) для порівняння методом статистичної теорії рішень.

Розроблені методи збору та обробки інформації для виявлення, селекції та ідентифікації об'єктів і вирішення проблеми дистанційного контролю у ІВС за допомогою ОЕП. Отримана залежність завадового сигналу ОЕП від коефіцієнта розсіяння.

Визначено, що найбільш істотний вплив на характеристики ОЕП мають: а) відбиваюча здатність поверхні; б) чергування та багаторазове повторення ділянок різної освітленості поверхні, вимірювання якої проводиться. Це дозволяє вважати необхідними методи захисту від світового фону постійного і флюктуючого характеру, включаючи залежність корисного сигналу від властивостей відбивної поверхні та кутів підходу до неї.

Розроблено метод комп'ютерного моделювання оптичного сигналу на вході ОЕП із застосуванням пакету програм Design Lab 8.0 і OR Cad.

Створена комп'ютерна модель оптичного каналу з урахуванням завадової ситуації та властивостей поверхні відбиття. Модель представлена у вигляді радіоелектронної схеми з підсхемами оптичного випромінювача, фотоприймача та власно оптичного каналу.

Розроблена методика випробувань ОЕП. Результати динамічних досліджень виявили визначальний вплив на точність вимірювань відбивних властивостей поверхні об'єкта і швидкісного режиму зближення. Показано, Інформаційний потік у ОЕП досягає 1,6 Мб/с, що відносить його до приладів високого класу точності.

Таким чином, використання прямолінійного фазового методу для вимірювання малих дистанцій, реалізованого на сучасній елементній базі з застосуванням оригінальних схемно-конструкторських методів, дозволило створити ОЕП з поліпшеними технічними характеристиками для роботи в динамічних умовах.

## Список використаних джерел до розділу 1

1. Козинцев В. И., Белов М. Л., Орлов В. М. Основы импульсной и лазерной локации: Учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 512 с.
2. Тимофеев О. П. Энергетический расчет измерительных оптико-электронных приборов с лазерами. Методические указания. JL: ЛИТМО, 1986. – 52 с.
3. Г. В. Меркишин, Д. С. Потапов. Оптико-электронные информационные системы с модулированным излучением. // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – № 11.
4. Г. В. Меркишин, Д. С. Потапов. Система радиовидения технических объектов. Проектирование, конструирование и производство авиационной техники / Под ред проф. Ю. Ю. Комарова. М.: Изд-во МАИ, 2005. – 340 с.
5. Лазерні вимірювальні системи. Під редакцією Д. П. Лук'янова. М., Радіо і зв'язок, 1981.
6. Duncan M. D., Mahon R., Tankersley L. L., Reintjes J. Time-gated imaging through scattering media using stimulated Raman amplification. // Opt. Lett., 1991, Vol. 16, No. 23, p. 1868–1870.
7. Якушенков Ю. Г. Теорія і розрахункові оптико-електронних приладів. М., Сов. Радіо, 1980.
8. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. Радио, 1977.
9. Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванеев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации: Учебное пособие для ВТУЗов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 295 с.
10. Оптическая погода / Зуев В. Е., Белан Б. Д., Задде Г. О. Новосибирск: Наука, Сиб. Отделение, 1990.
11. Баклицкий В. К., Бочкарев А. М., Мусьяков М. П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-



экстремальных системах навигации. М.: Радио и связь, 1986.

12. Молебний В. В. Оптико-локаційні системи. Основи функціональної побудови. М., Машинобудування, 1981.

13. Альbedo і кутові характеристики відбиття поверхні, що підстилає, і хмар. Під ред. К. Я. Кондратьєва. Л.: Гидрометеоиздат, 1981.

14. А.с. 1733979 СРСР, G 01 N 21/55, публ. 15.05.92, Бюл. № 18, заяв. 4787557/25 від 31.01.90. Спосіб визначення виду природної поверхні, що підстилає. Черешанский В. А., Иванченко И. А.

15. Ваксман Ю. Ф., Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Сантоний В. И. Статистичні ознаки аерозольних утворень і їхній вплив на роботу оптико-електронних навігаційних систем. Тез. докл. XX научн. конф. країн СНД “Дисперсні системи”, Одеса, 23-27 вересня, 2002, С. 44–45.

16. Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В., Щигликів Г. И. Оптико-електронні методи вивчення аерозолей. М.: Энергоиздат, 1981.

17. Молчанюк В. И., Сантоний В. И., Янко В. В. Оптико-електронні датчики контролю параметрів аеродисперсних середовищ. Тез. докл. XVIII конф. країн СНД, Одеса, 14–18 вересня, 1998, С. 118.

18. Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Иванченко И. А. Оптико-електронний датчик диму і система раннього виявлення загорянь. Тез. докл. Української н.-практ. конф. «Проблеми горіння, балістики і механіки зіткнень», Одеса, 10–15 червня, 1996.

19. Гендрин А. Г., Захаров И. В., Калинин А. Н., Комарів В. С., Фомін В. В. Інформаційне забезпечення оперативних розрахунків оптичних характеристик атмосфери. Тез. докл. VI Всесоюз. симпозіуму по поширенню лазерного випромінювання в атмосфері, Томськ, 1981, ч. 2, С. 24–27.

20. Якушенко Ю. Г., Луканцев В. Н., Колосов М. П. Методи боротьби з перешкодами в оптико-електронних приладах. М.: Радіо і зв'язок, 1981. – 180 с.
21. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. Основи інфрачервоної техніки. М.: Машинобудування, 1985.–264 с.
22. Фізика і техніка інфрачервоного випромінювання. Пер. під ред. Н. В. Васильченко. М.: Сов. Радіо, 1965.– 642 с.
23. Здор С. Е., Широков В. Б. Оптичний пошук і розпізнавання. М.: Наука, 1973. – 240 с.
24. Мирошников М. М. Теоретичні основи оптико-електронних приладів.– Л.: Машинобудування.– 1983.
25. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделювання Design Center (PSpice). М.: СК Пресс, 1996.
26. Резнов Н. В., Коропів В. Г. Теорія радіотехнічних ланцюгів. Л.: Енергія, 1972.
27. Ваксман Ю. Ф., Сантоній В. І., Будіянська Л. М., Іванченко І. О. Властивості відкритої ІЧ-оптопари лазерний діод-pin-фотодіод у газометричних системах ближнього дальнометрування динамічного призначення. Тези доповідей 10-ої Укр. наук. Конф. з фізики напівпровідників (УНКФП-1) (з міжнародною участю), Одеса, 10–14 вересня, 2002, Том 2, С. 185–186.
28. Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Иванченко И. А. Метод самосканирования для измерения диаграммы направленности оптико-электронных устройств // Труды Одесского политехнического университета, 2000, Вып. 2 (11), С. 168–172.
29. High-accurate optico-electronic distance measurement of short distances for moving objects. / Science and Technology Center in Ukraine. Annual Report 1999. Kyiv 2000, p. 43.
30. Сантоний В. И., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Устройство обнаружения препятствий для трости инвалида по зрению. Сб. научных трудов по материалам 5-го Междунар. Молодежного форума «Радиоэлектроника и

молодежь в XXI веке», Харьков, 24–26 апреля, 2001, Ч. 2, С. 302–303.

31. Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Фазовый оптико-электронный дальномер малых дистанций. Там же С. 304–305.

32. Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Система контроля параметров отстыковки малоразмерных спутников от космической платформы. Матеріали V-ої Міжнар. н.-практ. конф. “Сучасні технології в аерокосмічному комплексі”, Житомир, 4 - 6 вересня, 2001, С. 71–76.

33. High-Accurate Optico-Electronic Distance Measurement of Short Distances for Moving Objects. ABSTRACTS OF REGULAR PROJECTS, Odessa State University, Odessa. Budianskaya Ludmyla. STCU, ANNUAL REPORT, 2000. – 2001 p.

34. Ваксман Ю. Ф., Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Сантоний В. И. Статистические признаки аэрозольных образований и их влияние на работу оптико-электронных навигационных систем. Тез. докл. XX научн. конф. стран СНГ “Дисперсные системы”, Одесса, 23-27 сентября, 2002, С. 44–45.

35. Ваксман Ю. Ф., Иванченко И. А., Будиянская Л.М., Сантоний В.И. Исследование воздействия атмосферного аэрозоля на оптико-электронный блок навигационной системы. Там же, С. 46–47.

## **2. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ НАНОСЕКУНДНОГО ЧАСОВОГО ДІАПАЗОНУ В СИСТЕМАХ БЛИЖНЬОЇ ЛОКАЦІЇ**

Застосування оптичної локації для вимірювань у ближній зоні стикається з труднощами, обумовленими специфічними особливостями роботи. До них належать дефіцит часу обробки інформації, широкий діапазон зміни рівнів робочих сигналів, функціонування в складних умовах експлуатації і т. д. Це перешкоджає застосуванню відомих локаційних методів та робить актуальним створення нових спеціальних методів з використанням динаміки параметрів відбитого оптичного випромінювання у наносекундних процесах.

### **2.1. Оптико-локаційні методи вимірювання малих відстаней**

Оптико-локаційні вимірювальні пристрої і системи засновані на принципі локації об'єктів за допомогою електромагнітних хвиль оптичного діапазону і прямого або непрямого визначення часу та/або напрямку їх поширення від випромінювача до відбивача і назад.

Сучасний етап розвитку оптико-локаційної техніки характеризується розширенням кола задач, ускладненням структури систем та відповідним ростом технічних вимог. Розширення часового діапазону в наносекундну область передбачає зсув частотної характеристики пристрою у гігагерцовий діапазон, що досягається шляхом збільшення швидкодії активних елементів і точності вимірювань.

Застосування оптичної локації для вимірювань на великих дистанціях не потребує наносекундного рівня розділення, тому на довгих трасах, як правило, використовуються імпульсні методи прямого вимірювання

часового проміжку між випроміненим та відбитим імпульсами. У випадку вимірювань на малих відстанях з високою точністю перевага віддається оптико-локаційним системам з безперервним випромінюванням, в яких вимірювання часу проводиться непрямим методом, а саме шляхом використання фазових співвідношень прямого та відбитого променів.

Фазові системи ближньої дії використовують різні методи модуляції: гармонічний, багаточастотний, амплітудний, кодоімпульсний тощо.

Фазовий оптичний локаціатор з модульованим по амплітуді випромінюванням зондує об'єкт з виходу стабільного генератора. Світлочутливий елемент приймає відбите об'єктом випромінювання і передає сигнал на фазовий детектор, де проводиться порівняння з сигналом від гетеродина, що надходить напряму [1]. По різниці фаз  $\Delta\varphi$  цих сигналів проводиться вимірювання дальності

$$L = c\Delta\varphi / 4\pi f_m,$$

де  $c$  – швидкість світла,  $f_m$  – частота модуляції.

Застосований метод фотогетеродинування забезпечує прецизійні вимірювання відстані. Поєднання імпульсного метода визначення затримки сигналу з вимірюванням різниці фаз в одному пристрої дозволяє здійснювати відповідно грубе і точне вимірювання відстані до об'єкта.

До розряду нових належить метод вимірювання відстаней шляхом визначення оптичних частот при використанні лазера зі зворотним зв'язком і частотним зсувом [2].

В традиційному методі перетворення відстані у частоту биття існує зв'язок між діапазоном вимірювань та розділенням.

У новому методі такий зв'язок не спостерігається, тому високе розділення забезпечується для дуже великих відстаней.

Підвищення розділення по дальності в імпульсних лазерних локаційних системах досягнуте методом використання інверсної фільтрації [3]. Границя відомого методу, що відповідає тривалості імпульсу, зсувається в результаті обернення згортки з відомим по формі імпульсом лазерного випромінювання.

Математичне моделювання даного алгоритму вимірювання радіальних швидкостей з різними видами розподілу показало, що підвищення розділення по дальності дійсно значно підвищило розділення по швидкості.

Відомий метод високоточного визначення дальності з використанням хаотичної послідовності лазерних імпульсів [4]. Генерація такої послідовності імпульсів забезпечується шляхом виклику обвалу когерентності в AlGaAs напівпровідниковому лазері. За допомогою лазерного локатора, що працює за даним методом, досягнута точність визначення відстаней до міліметра.

Удосконалення оптико-локаційних систем безперервно пов'язано з процесом розвитку їх елементної бази – виробів електронної техніки, і, перш за все, джерел та приймачів випромінювання.

Продовжується пошук нових альтернативних напрямків розвитку елементної бази. Теоретично доведена принципова можливість створення та експериментально реалізовані активні елементи для оптоелектроніки, що функціонують на основі ефектів квантової механіки [5]. Такі елементи відрізняються дуже великою швидкодією, що характеризується часом квантово-розмірних ефектів, наприклад, резонансним тунелюванням електронів, яке складає 1 фс [6].

Якісно нові елементи, що одержують на основі нанорозмірних структур, здатні забезпечувати продуктивність до  $10^{12} \div 10^{14}$  біт/с та роботу при частотах до 10 ТГц. Перехід від виробів мікроелектроніки до наноелектронних елементів дозволяє задовольнити найбільш жорсткі вимоги перспективної електронної апаратури за швидкістю (0,001÷10 пс), температурним діапазоном (500÷1000 К), розмірами елементів (0,01÷0,05 мкм) та щільністю їх упаковки ( $0,1 \div 10 \cdot 10^9$ ).

В [7] продемонстрована можливість створення швидкодіючих рпн-фотодіодів з високою потужністю та зовнішньою ефективністю (до 0,71 А/Вт). Досягнення даних властивостей пов'язано з використанням хвилевидної структури з градієнтом показника заломлення у вигляді трьох шарів InAlGaAs товщиною 0,7 мкм. Одержана смуга пропускання більш 40 ТГц при середній величині фотоструму 10 мА.

Гігабітною швидкістю (1÷1,2 Гбіт/с) та високою ефективністю (20÷30 %) володіють світлодіоди GaAs/AlGaAs на квантових ямах з зовнішньою меза-структурою діаметром 30 мкм [8]. Високі параметри світлодіодів обумовлені використанням скляних мікролінз діаметром 12-15 мкм, що формують токову апертуру над активним шаром. Параметри світлодіода практично не залежать від температури, що складає його безсумнівну перевагу.

Подальші шляхи розвитку в області оптичної техніки пов'язують з фемтосекундною оптоелектронікою [9], представленою дослідженнями надшвидкісних фотопровідних перемикачів у наноструктурах GaAs.

В теперішній час виробляються швидкодіючі фотоприймачі та фотоприймальні модулі нового покоління для оптичного зв'язку та дальнометрії в інтервалі довжин хвиль 0,8÷1,7 мкм [10]. Для реєстрації світлових імпульсів з довжиною хвилі від 220 до 860 нм в наносекундному та

субнаносекундному діапазонах призначений швидкодіючий фотоприймач на основі фотопомножувача ФЭУ-165 [11]. Рекордні показники (ширина смуги пропускання 3 дБ на частоті 310 ГГц и ширина імпульсу 0,97 пс) досягнуті у фотодіоді на гетероструктурі In/InGaAs [12].

Регулювання точності вимірювань здійснюється шляхом застосування часових пристроїв підвищеної точності, наприклад, прецизійного хронометра, зв'язаного з датчиком та приймачем [13]. У центральний процесор, пов'язаний з хронометром, надходять відбиті імпульси з встановленим у блоці шумового порога відношенням сигнал/шум. Тут по зареєстрованим моментам випромінювання та приходу імпульсів визначається відстань до об'єкта.

Можливе підвищення точності шляхом обчислення часових інтервалів між світловими імпульсами по більш коротким вимірним і тактовим імпульсами, що обрамляють світлові імпульси [14]. При цьому випромінювач та приймач керуються тактовими сигналами передачі та прийому відповідно.

Імпульсний метод вимірювання часу проходження випромінювання від джерела до об'єкта і назад використовується у вимірювачах швидкості [15]. Лазерний генератор видошукачем наводиться на об'єкт і спрямовує до нього послідовність зондуючих імпульсів. На основі зареєстрованого часу запізнення імпульсів і швидкості світла визначається послідовність миттєвих відстаней до об'єкта, котра з урахуванням часового інтервалу між імпульсами визначає його швидкість відносно вимірювача.

Вимірювання кутового положення об'єкта у сполученні з вимірюванням відстані до нього по часу затримки дозволяє визначити форму траєкторії руху [16]. Для цього приймач нерухомого вимірювача виконується у



виді матриці датчиків, по положенню точки падіння відбитого випромінювання на котрій визначається кут між рухомим об'єктом і вимірювачем. Накладання або змішування зондуючого і відбитого променів використовується у пристроях, заснованих на частотному методі биттів. У когерентному лазерному промені при накладанні променя, відбитого об'єктом, утворюється змішаний промінь з биттями, частота котрих відповідає дальності до об'єкта [17]. Точність метода визначається точністю вимірювання хвильових чисел биттів до десятичної коми з застосуванням тактових імпульсів з частотою, що перевищує частоту биттів.

Регулювання діапазону вимірювань, зокрема у бік малих дистанцій, здійснюється у пристрої з перестроюваними по частоті модуляційними генераторами за рахунок штучного збільшення постійної приладу шляхом введення в тракт вимірюваного сигналу схеми часової затримки, а також допоміжного генератора [18].

Час затримки сигналу визначається часовим інтервалом півперіоду частоти допоміжного генератора, що імітує час проходження світловим променем визначеної відстані. Це дозволяє зменшити величину потрібного перестроювання частоти основного генератора, що особливо важливо при вимірюванні малих відстаней.

Основним напрямком розвитку оптико-локаційних систем є підвищення точності вимірювань. У фазовому світлодальному з ЗВЧ-модуляцією досягається можливість вимірювання фазового зсуву на більш низькій частоті [19]. Співвідношення між частотою модуляції і проміжною частотою, на якій проводиться вимірювання фазового зсуву, досягає  $10^6$ . Це дозволяє зменшити вплив фазових нестабільностей електронних і електронно-оптичних трактів та елементів, зменшити циклічну похибку і похибку дискрета. Результат досягається шляхом

введення блока дискретних фазових затримок, мікропроцесора та блока пам'яті.

Застосування у світлодальному флукутуючого частково когерентного джерела безперервного випромінювання та використання кореляційних властивостей випромінюваного світлового потоку дають можливість підвищити точність вимірювань, оскільки вона визначається у цьому випадку тільки величиною часової кореляції [20]. Час, що витрачається світловим потоком на проходження подвійної вимірювальної відстані, визначається компенсаційним способом за допомогою блоку визначення часової затримки. Таким чином здійснюється безперервна кореляція електричних сигналів, відповідних опорному, флукутуючому та частково когерентному потокам.

Очевидні наступні переваги кореляційних методів: відсутні вимоги до частотної і амплітудної стабільності джерела випромінювання, не потрібна будь-яка модуляція випромінюваного світлового потоку, не накладаються обмеження на лінійність приймачів випромінювання, суттєво підвищується завадозахищеність світлодальному.

## **2.2. Математичний розрахунок та структурна схема фазового методу**

У ближній зоні, у межах відповідних ділянок використовуються проекційно-геометричні, інтерференційні та фазові методи вимірювань.

Підвищення точності та збільшення ефективності вимірювань на засаді аналізу властивостей відбитої оптичної хвилі у відкритому атмосферному каналі у наносекундному часовому діапазоні потребує створення нових методів оптичної локації. Максимальною точністю

володіють фазові методи, засновані на вимірюванні фазових співвідношень між випроміненим та відбитим оптичними сигналами, що забезпечують вимірювання дистанцій з похибкою у декілька міліметрів [21].

Фазовий метод належить до числа локаційних та базується на непряму вимірюванні часу прольоту оптичним випромінюванням подвійної відстані до об'єкта. У методах цього класу вимірюється такий параметр сигналу як зсув фази.

Основною формулою фазового метода вимірювання дистанції в оптичній локації є [22]

$$l = [\Delta\varphi / (2\pi)] \cdot [c / (2f)], \quad (2.1.)$$

де  $l$  – вимірювана дистанція,

$\Delta\varphi$  – зсув фази,

$c$  – швидкість світла у повітрі,

$f$  – частота сигналу.

Вимірювання у наносекундному часовому діапазоні з точністю не гірше 0,5 % сформуvalo проблему високої точності при значному обмеженні часу вимірів, що виключає дискретизацію зонduючого світлового потоку. За таких умов перевага віддана використанню безперервного локаційного сигналу з гармонічною модуляцією, біжуча фаза  $\varphi$  якого є лінійною функцією часу  $t$

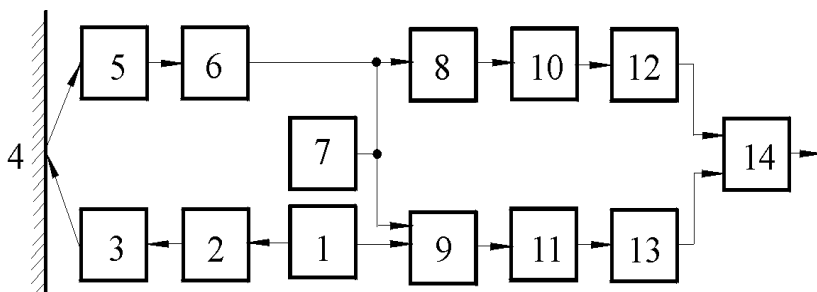
$$\varphi = 2\pi f_m t + \varphi_o, \quad (2.2.)$$

де  $f_m$  – частота модуляції сигналу;

$\varphi_o$  – початкова фаза.

У оптико-електронному дальномірі (ОЕД) для вимірювання малих дистанцій у динамічних умовах використано фазовий метод вимірювання дальності на

низькій проміжній частоті [2]. На рисунку 2.1 представлена структурна схема прямокутного фазового методу вимірювання дальності на низькій проміжній частоті, застосованого в розробленому ОЕД [24]. Схема включає два канали – вимірювальний (блоки 2, 3, 5, 6, 8, 10, 12) і опорний (блоки 9, 11, 13), різниця фаз вихідних сигналів яких прямопропорційна величині вимірюваної дистанції.



**Рисунок 2.1.** Структурна схема прямокутного фазового методу вимірювання дальності

ВЧ-сигнал з опорного генератора 1 через підсилювач потужності 2 надходить на випромінювач 3. Модульований ВЧ-сигналом світловий потік випромінювача 3, що відбився від поверхні об'єкта 4, надходить на фотоприймач 5.

Електричний сигнал фотовідповіді з виходу фотоприймача 5, посилений підсилювачем 6, надходить на вхід перемножувача 8. В той же час на вхід перемножувача 9 ВЧ-сигнал надходить безпосередньо з опорного генератора 1.

Таким чином, сигнал з опорного генератора 1 надходить на вхід перемножувача 8 через часову лінію затримки, утворену елементами відкритого оптичного каналу дальноміра, а на вхід перемножувача 9 – напряму.

Вимірювальний сигнал з виходу перемножувача 8 і опорний сигнал з виходу перемножувача 9, перемножені з сигналом гетеродина 7, надходять на входи фільтрів низької частоти 10 і 11 відповідно.

З виходів фільтрів НЧ-складові опорного і вимірювального сигналів через підсилювачі-обмежувачі 12 і 13 надходять на вхід вимірника різниці фаз 14, де проводиться аналіз часових зсувів опорного і відбитого сигналів і обчислення поточної вимірюваної відстані.

На виході вимірника різниці фаз 14 формується напруга, величина якої прямо пропорційна різниці фаз і, відповідно, вимірюваній дистанції.

Алгоритм функціонування структурної схеми наступний. У випромінювальному блоці за допомогою лазерного діода, відповідних генеруючих і підсилювальних елементів формується оптичний ВЧ-сигнал нормованої потужності. Підсилювальна частина випромінювального блоку містить високоомний буферний підсилювач на виході генератора 1 і підсилювач потужності 2 типу «перетворювач напруга-струм», безпосередньо навантажений на випромінювач 3.

Підбором елементів схеми досягається максимальний рівень лінійності в роботі випромінювача, що забезпечує мінімальні гармонійні спотворення модуляційного сигналу, що дозволяє істотно підвищити точність вимірювання дистанції  $\Delta S$ .

Відбитий оптичний сигнал реєструється і перетворюється фотоприймачем 5, який навантажується на резонансний контур, налаштований на модуляційну частоту. Опорний сигнал формується гетеродином 7 в перемножувачі 8. Гетеродинне перетворення частоти вимірювального і опорного сигналів здійснюється з використанням загального кварцового резонатора 7, що визначає частоту гетеродинного сигналу кожного каналу.

Високий ступінь стабільності ВЧ-сигналів опорного генератора 1 і гетеродина 7 досягається за допомогою кварцових резонаторів, частоти яких відрізняються на необхідну величину проміжної частоти.

Виділення проміжної низької частоти здійснюється в результаті ВЧ-фільтрації обох сигналів за допомогою фільтрів низької частоти 10 і 11. Таким чином, створюються умови для вимірювання різниці фаз на низькій проміжній частоті, що забезпечують високу точність вимірювань.

Модифікований метод локаційних вимірювань дозволяє покращити оперативну обробку сигналу у широкому динамічному діапазоні та розширити можливості відомих оптичних методів дальнометрії.

Особливості побудови та застосування лазерних локаційних систем у значній мірі визначаються властивостями таких основних елементів, як лазерний випромінювач (В) і фотоприймач (ФП), що утворюють відкриту оптичну частину вимірювача [25].

В ОЕД малого радіуса дії визначальними факторами є мале енергоспоживання, маса та габаритні розміри. Найбільш повно цим вимогам задовольняють такі випромінювачі, як напівпровідникові лазери, де активним елементом є кристал напівпровідника, та лазерні діоди. У ближній ІЧ-області ефективними ФП є фотодіоди, особливо кремнієві та германієві.

Підвищення точності вимірювань малих дистанцій пов'язано із зменшенням тривалості зондуючих імпульсів та підвищенням потужності випромінювання. Досягнення даного рівня точності можливо в умовах роботи у мегагерцовому частотному діапазоні, що формує високі вимоги до швидкодії елементів оптико-електронного блоку далекоміра. Час переключення В та час розсмоктування основних носіїв ФП повинні бути не більше 10 нс.

Використання ріп-структур дозволяє скоротити постійну часу сучасних фотодіодів до декількох наносекунд, що еквівалентно ширині смуги пропускання порядку гігагерц з одночасним зменшенням вихідної ємкості.

Ступінь узгодження оптопар по спектру, який визначає збіг довжини хвилі випромінювання світлодіода та максимуму спектральної чутливості фотодіода, у добре узгоджених пар перевищує 0,9. Для спектральної області 0,9...1,0 мкм оптимальними за спектром та швидкодією або за одним з цих параметрів вважається оптопара світлодіод на основі GaAs та його сполук – Si-ріп-фотодіод [26].

Вибір ФП при побудові ОЕП у першу чергу визначається його спектральною чутливістю та можливістю спільно з оптичною системою вирішувати задачі оптимальної спектральної фільтрації при виділенні сигналів на фоні перешкод.

З відомих методів реалізації оптимального фільтра перевага віддається двом: спектральний діапазон визначається областю спектральної чутливості ФП та функції фільтра виконуються елементами ФП. Ці методи реалізуються у ФП, корпус якого виконаний із матеріалу з властивостями смугового спектрального фільтра для робочих довжин хвиль, що покращує співвідношення сигнал/шум у каналі фотоприйому та виключає необхідність спектральної фільтрації в оптичному блоці.

Потужність лазерного випромінювача регламентується необхідністю виключення впливу відбивальних властивостей поверхні об'єкта. Це передбачає генерацію рівня потужності, достатнього для реєстрації відбитого сигналу у каналі фотоприйому на протязі всього діапазону відстаней, тобто сигналу, що перевищує порогову чутливість ФП.

Синтез оптичного лазерного випромінювача проводиться у напрямку досягнення високої міри

лінійності (відсутності значних гармонічних спотворень) в формі модуляції оптичного променя. Підбором елементів схеми досягається максимальний розмах змінної складової струму крізь лазерний випромінювач при умові роботи на лінійній ділянці вольт-амперної характеристики. Оптичний лазерний випромінювач працює у лінійному режимі з постійним стабілізованим струмом та заданою амплітудою. У схему лазерного випромінювача включається каскад регулювання рівня сигналу для автоматичного регулювання посилення, що охоплює високочастотний тракт ОЕД.

У структуру ФП включається резонансний підсилювач сигналів. Від міри стабільності його фазочастотної характеристики в умовах зміни температури, напруги живлення та напруги управління залежить точність вимірювання.

Фотоприймач, включений безпосередньо у вхідний контур підсилювача, робить структуру нечутливою до низькочастотних і постійних перешкодових засвітлювань. Вхідний і вихідний контури підсилювача настроюються точно на частоту сигналу оптичного сигналу. При цьому досягається нульовий фазовий зсув сигналу.

Задача зведення потоку випромінювання у межах всієї апертури та поля зору вирішена сумісним оптико-геометричним розрахунком елементів оптичної системи, включаючи лазерний випромінювач та ФП.

Узгодження за апертурним кутом забезпечує повне використання випроміненої енергії та чутливості приймача.

Зниження ефективної фонові освітленості ФП досягається за рахунок зменшення його апертурного кута до величини апертури оптичної системи.

При узгодженні активних елементів з оптичною системою максимально використовуються можливості ФП.



Розміри фоточутливої площадки ФП мінімальні для покращення фокусування енергії випромінювання при заданому полі зору ОЕД, чим забезпечується більша роздільна здатність оптичної системи.

Взаємозв'язок поля зору, роздільної здатності та фокусної відстані оптичної системи спрямовані на забезпечення енергетичних співвідношень необхідного рівня згідно з умовами дії пристрою.

Вивчення сучасного ринку оптоелектроніки дозволяє відзначити, що останнє покоління GaAs-світлодіодів відрізняється більш високою квантовою ефективністю ( $\Phi_e$  – 700 мВт). Постійна часу pin-Si-фотодіодів скорочена до наносекунд, що еквівалентно ширині смуги пропускання порядку гігагерц.

Розрахунок меж застосування локаційних фазових методів в залежності від швидкісних умов проводиться, виходячи із взаємозв'язку між точністю вимірювання дистанції  $\Delta S$  и точністю підрахунку фазового зсуву  $\Delta_\varphi$ , що має вигляд [27],

$$\Delta_\varphi = \varphi_{одн}(\Delta S / S),$$

де  $\varphi_{одн}$  – фазовий цикл однозначного вимірювання відповідає  $2\pi$ .

В умовах переміщення оптичного лазерного перетворювача (ОЛП) вздовж вимірюваної дистанції зі швидкістю  $v$  виникає залежність точності вимірювань  $\Delta S$  від її величини та часу  $t_{вим}$  проходження та вимірювання дистанції  $\Delta S$ , що має вид

$$\Delta S = v \cdot t_{вим}. \quad (2.3.)$$

Очевидно, що дія ОЛП у наносекундному часовому діапазоні точність роботи визначає межі вимірювання:  $10^{-6}\text{с} < t_{\text{вим}} < 10^{-9}\text{с}$ .

При нормованій точності вимірювання  $\Delta S$  не гірше 0,5% та зазначеному часовому діапазоні  $t_{\text{вим}}$  цілком визначеним є діапазон можливих швидкостей  $v$  застосування ОЛП.

Досягнення певної точності вимірювань вимагає проведення багатократних вимірювальних процедур числом  $n_{\sigma}$ .

При тривалості однократного вимірювання  $t_o$  сумарна тривалість складає час вимірювання

$$t_{\text{вим}} = t_o \cdot n_{\sigma} . \quad (2.4.)$$

При заповненні вимірювального інтервалу  $t_o$  лічильними імпульсами числом  $n_3$  та тривалістю  $t_3$  співвідношення між цими величинами має вигляд

$$t_o = n_3 t_3 . \quad (2.5.)$$

З урахуванням (2.4.) та (2.5.) співвідношення (2.3.) перетворюється до виду

$$\Delta S = v n_3 n_{\sigma} t_3 . \quad (2.6.)$$

Одержане рівняння (2.6.) дозволяє визначати роздільну здатність ОЕП за швидкістю та вирішувати зворотну задачу зв'язку між часовими характеристиками та точністю вимірювання відстані.

Нижче приведений ряд оцінок, що дозволяють одержати точність вимірювань ОЕД порядку 1 % при переміщенні із швидкостями до 20 м/с в діапазоні дистанцій 0,3...10,0 м.

Мінімальна вимірювана дистанція перетворювача 0,3 м визначається обмеженнями оптичної системи ОЕД, які виражаються у формуванні мертвої зони для прийому відбитого випромінювання.

Відповідно до принципу однозначності довжина хвилі модуляції оптичного зонduючого ВЧ-сигналу рівна подвоєному  $S_{\max}$ , тобто 20 м. Цій дистанції, згідно (2.3.), відповідає частота модуляції  $f_m = 15$  МГц. За умови реєстрації позитивного і негативного переходу синусоїдального сигналу через нульовий рівень, фазовий цикл вимірювального сигналу можна зменшити удвічі до діапазону  $\varphi_y = 0...180^\circ$ , а частоту зонduючого сигналу – до 7,5 МГц.

Для мінімальної вимірюваної дистанції  $S_{\min} = 0,3$  м діапазон переміщення ОЕД, відповідний даній точності вимірювання,  $\Delta S_{\min} = 3$  мм.

Час проходження  $\Delta S_{\min}$  з максимальною швидкістю  $v_{\max} = 20$  м/с складає 150 мкс, що визначає мінімальний час вимірювань  $t_{\min}$  в діапазоні вимірюваних дистанцій.

Це означає, що за апаратний час вимірювання поточної дистанції величина взаємного переміщення дальноміра і об'єкта вимірювання не викличе зсуву фази зонduючого ВЧ-сигналу, що перевищує 1 % точності вимірювань.

Виходячи з величин  $t_{\min} = 150$  мкс і  $\varphi_y = 0...180^\circ$ , мінімальна проміжна частота  $f_{np} = \frac{1}{2} t_{\min} = 3,3(3)$  кГц за умови, що вимірювання поточного значення дистанції відбувається протягом кожної половини періоду проміжної частоти. Таким чином, при максимальній швидкості відносного переміщення  $v_{\max} = 20$  м/с весь діапазон

вимірюваної дистанції долається за час  $T = 0,5$  с, протягом якого здійснюються багатократні вимірювання поточної відстані наступним числом:

$$n_m = T/0,5T_{np} = 3,3(3) \cdot 10^3,$$

де  $T_{np}$  – період проміжної частоти.

Звідси витікає, що абсолютна динамічна точність вимірювання поточної відстані у всьому діапазоні дистанцій буде не гіршою 3 мм.

Для проведення вимірювань в діапазоні дистанцій 0,3...10,0 м з дискретністю 3 мм необхідний вимірник різниці фаз опорного і відбитого сигналів, що дозволяє реєструвати мінімальну зміну фази величиною

$$\Delta\varphi_{\min} = \frac{\phi_u \Delta S_{\min}}{S} = 0,054^\circ.$$

Для моделювання ОЛП як оптико-електронної системи та його алгоритму вимірювань застосована програма схемотехнічного моделювання PSpice [28].

Головним припущенням моделювання є заміщення оптичного каналу еквівалентною електричною схемою на основі подібності фізичних процесів розповсюдження електромагнітних хвиль радіо- та оптичного діапазонів.

Метод заміщення оптичного каналу застосований при розробці фазового вимірювача дистанції з високою швидкістю [29]. Аналогом поширення світла в оптичному каналі прийнято поширення радіосигналу у лінії передачі без втрат, яка є стандартним елементом мови PSpice.

В ОЛП з використанням світлодіодів та модуляцією світлового потоку по інтенсивності він заміщується чисельно рівною йому напругою. При цьому модуляційна характеристика світлодіода задається ідеальним джерелом напруги, керованим струмом через випромінювач.

Для ОЛП структура алгоритму вимірювань визначається послідовністю вимірів амплітудних співвідношень, що описуються основним енергетичним рівнянням оптичної локації [34]

$$\Phi_{fn} = \tau_c^{2l} \tau_o \rho L D_g^2 A_{ex} A_2 \Omega / \pi l^2,$$

де  $l$  – вимірювана дистанція,

$\tau_c$  – коефіцієнт послаблення середовища,

$\tau_o$  – коефіцієнт поглинання оптичних систем випромінювача і приймача,

$\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта,

$L$  – яскравість випромінювача,

$D_g$  – діаметр оптичної системи випромінювача,

$A_{ex}$  – площа вхідної зіниці оптичної системи приймача,

$A_2$  – видима із вхідної зіниці площа поверхні об'єкта,

$\Omega$  – тілесний кут випромінювання.

Моделювання енергетичних співвідношень здійснюється за допомогою джерела напруги, керованим напругою з коефіцієнтом передачі, відповідним локаційному типу пристрою.

### **2.3. Методи і засоби вимірювання параметрів інформаційного сигналу в умовах обмеження часу**

У питанні з'ясування структури відбитої оптичної хвилі проводиться урахування просторової та часової залежності локаційних сигналів від параметрів руху об'єкта спостереження.

Залежність просторово-часових процесів від лінійних координат фізично очевидна.

Часова залежність пояснюється рухом об'єкта або вимірювача, а також часовою нестабільністю параметрів середовища поширення оптичних коливань та змінними коефіцієнтами відбиття поверхні об'єкта.

У загальному випадку хвильове поле від випромінювача представлено у вигляді добутку функцій координат  $x, y, z$  та часу  $t$  [30]:

$$s(x, y, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) A_{\omega}(x, y, z) e^{j\omega t} d\omega,$$

де  $f(\omega)$  – спектральна щільність часового множника поля;

$A_{\omega}(x, y, z)$  – комплексна амплітуда складової поля на частоті  $\omega$ .

Поле  $s(x, y, z, t)$  є випадковим, тому для його опису використовують статистичні характеристики.

Багато які статистичні питання вирішуються в рамках кореляційної теорії.

Для просторово-часових сигналів кореляційна функція є добутком просторової та часової складових для двовимірного  $s(x, y)$  поля, тобто з розподіленням амплітуд на площині  $xy$

$$B(\Delta x, \Delta y, \Delta t) = B(\Delta x, \Delta y) B(\Delta t).$$

Такий запис справедливий, коли випадкові зміни просторово-часового сигналу у часі та на площині  $xy$  незалежні.

З'ясоване аналітичне визначення часової залежності локаційних сигналів, що вимірюються фазовим методом.

Оптичний сигнал на відстані  $l$  від випромінювача дорівнює

$$s(t, l) = A_s \cos(\omega_{so} t + \varphi_{so} - \omega_{so} l / c),$$

де  $A_s$  – амплітуда сигналу,

$\omega_{so}$  – частота сигналу,

$\varphi_{so}$  – початкова фаза сигналу в точці випромінювання,

$c$  – швидкість світла.

Як відомо [31], відстань, вимірювана фазовим методом, дорівнює

$$l = \Delta\varphi_{вим} c / \omega_{so},$$

де  $\Delta\varphi_{вим}$  – різниця фаз.

У зв'язку з нестабільністю частоти  $\omega_s$  основного генератора різниця  $\Delta\omega_{sr}$  його частоти та частоти  $\omega_r$  опорного генератора є випадковою функцією.

Різниця  $\Delta\omega_{sr}$  є стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним очікуванням, дисперсією та інтервалом кореляції  $\tau_{\kappa\Delta\omega}$ . Наявність випадкового розходження частот призводить до випадкової зміни фазового зсуву між коливаннями, що робить його нестаціонарним випадковим процесом з дисперсією, змінною у часі. Тоді дисперсія  $D^{1/2}(\Delta l_{нест}, t)$  може бути розрахована таким чином

$$D^{1/2}(\Delta l_{нест}, t) = \frac{D^{1/2}(\Delta\omega_{sr})}{\omega_{so}} c \sqrt{\tau_{\kappa\Delta\omega} t},$$

При постійному розходженні частот  $\Delta\omega_{пост}$  похибка вимірювання відстані дорівнює

$$\Delta l_{\Delta\omega} = \Delta\omega_{\text{ном}} ct / \omega_{so}.$$

Отже, похибка вимірювання відстані накопичується у часі. Фазовий зсув з урахуванням нестабільності фаз в апаратурі вимірюється з точністю  $\delta \approx 10^\circ = 0,16 \text{ рад}$ .

Тоді похибка вимірювання відстані  $\delta l_\varphi$  або затримки  $\delta t_l$  складає

$$\delta l_\varphi \lambda_s = \delta t_l / T_o = \delta \varphi_l / 2\pi,$$

де  $\delta t_l = 0,025T_o$ ,  $T_o$  – період коливання з частотою  $f_{so}$ .

Дистанційний ОЕД є відбивним оптроном з відкритим оптичним каналом. Принцип вимірювання дальності в ньому заснований на проєкційно-геометричних співвідношеннях в системі випромінювач–відбивач–приймач.

Розроблений авторами датчик відноситься до числа пристроїв, що використовують базовий метод вимірювання відстані до об'єкту по положенню світлової плями на поверхні фотоприймального елемента [32].

Світловий потік на вході фотоприймача  $\Phi$  підкоряється закону зворотних квадратів відстаней  $l$  [33]

$$\Phi = \tau_c^{2l} \tau_o \rho I A_{ex} A_2 / l^2, \quad (2.7.)$$

де  $\tau_c$  і  $\tau_o$  – коефіцієнт пропускання середовища і оптичних систем відповідно;

$\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні;

$I$  – яскравість випромінювача;

$A_{ex}$  – площа вхідної апертури приймача;

$A_2$  – площа світлової плями на відбивній поверхні.



При пороговому методі реєстрації дальності похибка її вимірювання, пов'язана з розкидом  $\rho$ , визначається як [27]

$$\Delta l = \frac{l_{\phi} [(\rho_{\max} / \rho_{\min})^{1/2} - 1]}{2},$$

де  $l_{\phi}$  – фіксована дальність,

$\rho_{\max}$  і  $\rho_{\min}$  – максимальне і мінімальне значення коефіцієнта відбиття поверхні.

У характерному для природних і штучних поверхонь діапазоні  $\rho$  значення похибки  $\Delta l$  наближається до 2.

На рисунку 2.2. наведена оптико-геометрична модель ОЕП.

Оптико-геометрична модель ОЕД заснована на базовому методі вимірювання дальності, при якому із зміною дистанції відбувається лінійний зсув сфокусованої світлової плями по поверхні фотоприймача. При цьому траєкторія переміщення фокальної плями лежить в одній площині і практично паралельна базовій лінії при малих кутах перетину ( $< 5^{\circ}$ ) оптичних осей випромінювача і приймача, а напрям її зсуву радіальний (при зближенні – від центральної осі сенсора).

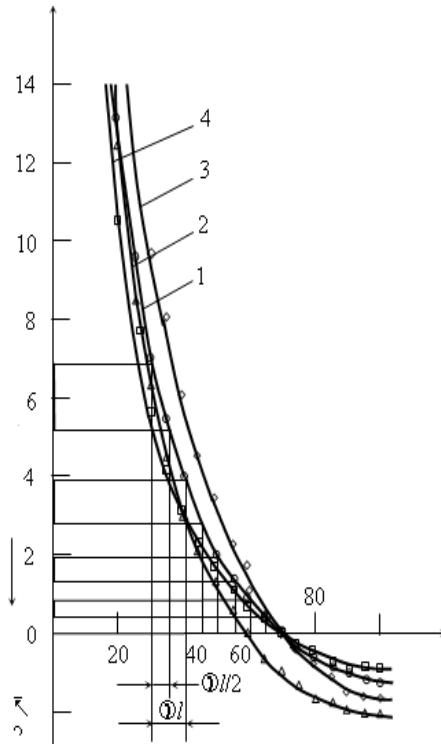
Переміщення зображення досліджуваної поверхні має місце при її скануванні, а у відсутність пристроїв, що сканують, пояснюється процесом самосканування [34], характерним, наприклад, для радіолокаційних станцій бічного огляду, вживаних в рухомих літальних апаратах [31].

Аналіз переміщення зображення, пов'язаного з рухом ОЕД відносно поверхні, дозволяє ввести в алгоритм його роботи додаткову функцію вимірювання швидкості.



$$a_u = \frac{bf(l-l_{\text{дн}})}{l \cdot l_{\text{дн}} - b \cdot \text{tg}\gamma(l-l_{\text{дн}})}. \quad (2.8.)$$

Вигляд залежності  $a_u(l)$  в параметрах геометричної моделі сенсора наведений на рисунку 2.3 [35].



**Рисунок 2.3.** Дистанційна залежність координати  $a_u$  центра світлової плями на площадці фотоприймача

Розрахункова залежність положення зображення  $a_u$  від дальності  $l$  для макету сенсора з  $b = 75$  мм,  $l_{\text{дн}} = 70$  см,  $f = 50$  мм показана на рисунку 2.3, крива 1.

Зміна графіка  $a_u(l)$  із зміною одного із розрахункових параметрів наведена кривими 2 ( $l_{\text{он}} = 60$  см), 3 ( $b = 85$  мм) і 4 ( $f = 40$  мм).

Похідна координати  $a_u$  по дистанції  $l$  визначає швидкість сканування зображення світлової плями по майданчику приймача

$$\frac{da_u}{dl} = \frac{bfl_{\text{он}}(1 + l_{\text{он}} - b \cdot \text{tg}\gamma)}{[l(l_{\text{он}} - b \cdot \text{tg}\gamma) + l_{\text{он}}]^2} \quad (2.9.)$$

Очевидно, що швидкість сканування зображення нелінійна і збільшується із зменшенням дистанції. При цьому траєкторія сканування несиметрична відносно оптичної осі об'єктиву приймача із зсувом в радіальному напрямі від осі симетрії пристрою.

Враховуючи прямолінійність сканування зображення в базовому ОЕД, імпульсну модуляцію реалізують растрові ґрати щілястого типу, розташовані у фокальній площині об'єктива приймача. Тривалість імпульсу і частота створеної ґратами модуляції визначається їхньою будовою і швидкістю руху ОЕД. Імпульсний сигнал, сформований за допомогою растрових ґрат, характеризується періодом  $T = \Delta l/v$  і частотою  $\tau = v/\Delta l$ , де  $v$  – швидкість руху ОЕД. Виходячи з цього, апріорні дані про співвідношення між структурою ґрат і дистанцією в сукупності із вимірною частотою модуляції дозволяють визначити швидкість руху сенсора. Застосування растрових ґрат перетворює безперервну функцію  $f(1/l^2)$  у послідовність імпульсів, кількість, періодичність і дистанційне розташування яких визначаються структурою ґрат.

Таким чином, введення в дистанційний ОЕД растрових ґрат збільшує точність вимірювання відстані шляхом дистанційної прив'язки сформованих растром імпульсів та доповнює функціональні можливості ОЕД

вимірюванням швидкості руху. Інформація, що одержується із оптичного сигналу відбиття, у значній мірі залежить від таких факторів, як стан атмосфери, структура поверхні об'єкта, режим роботи локатора. Цими факторами визначається вибір методу обробки локаційного поля. Тому математична модель сигналу повинна адекватно описувати просторову та часову характеристику поля на приймальній апертурі локатора, характер відбиття від об'єкта локації, амплітудно-фазове розподілення відбитого поля, вплив атмосфери.

Єдиної загальноприйнятої моделі просторового локаційного сигналу поки немає. Звичайно у кожному конкретному випадку на основі відомих експериментальних даних намагаються знайти її найбільш правдоподібний вигляд.

Найбільш розповсюдженою із числа ідеалізованих моделей, подібних реальним полям, є наступна. Експериментальні дані показали, що всі можливі типи об'єктів діляться на два основних класи, незалежно від їх розмірів і відстані до приймальної апертури: дифузно відбивачі та дзеркальні.

Відбиття від дифузної поверхні описується законом Ламберта. Дифузно відбиваючий об'єкт являє собою сукупність великого числа точкових джерел випромінювання, хаотично розташованих на поверхні об'єкта.

Амплітуда світлової хвилі, що формується окремим точковим джерелом, пропорційна коефіцієнту відбиття даної області поверхні об'єкта. Фази елементарних джерел можливо вважати незалежними. В такій моделі відбите від поверхні поле є дельта-корельованим:

$$\langle E(r_1)E(r_2) \rangle = I(r_1)\delta(r_1 - r_2),$$

де  $I(r_1)$  – середня інтенсивність лазерного випромінювання на поверхні об'єкта в точці  $r_1$ .

Відбите від об'єкта поле випромінювання на приймальній апертурі, представляється у виді суперпозиції полів від окремих точкових джерел на поверхні об'єкта. Якщо ввести на поверхні об'єкта координату  $r$ , а на приймальній апертурі координату  $\rho$ , то поле  $E_k(r_a, r_k)$ , випромінене  $k$ -м джерелом, що знаходиться в точці  $r_k$  поверхні об'єкта, запишеться в точці  $\rho$  приймальної апертури наступним чином [36]:

$$E_k(r_a, r_k) = a_k \frac{1}{l(r_a, r_k)} \exp\left[ i\varphi_k + i \frac{2\pi}{\lambda} R(r_a, r_r) \right], \quad (2.10)$$

де  $l$  – відстань від приймальної апертури до поверхні об'єкта.

Вираз (2.10) описує сферичну хвилю, що поширюється із точки  $r_y$ . Сумарне поле  $E(r_a)$  від всіх точкових джерел на поверхні цілі дорівнює сумі всіх полів виду (2.10).

У випадку дзеркально відбиваючого об'єкта потужність випромінювання, що попадає на приймальну апертуру від дзеркальних областей, на багато порядків перевищує потужність випромінювання, що попадає на приймальну апертуру від дифузно відбиваючих областей.

Поле  $E(\rho)$ , відбите від плоскої дзеркальної області  $\sigma_m$ , може бути розраховане за формулою

$$E_m(\rho) = c \int_{\sigma_m} E_m(r) \frac{1}{R(r, \rho)} \exp[ikR(r, \rho)] d\sigma_m, \quad (2.11.)$$

якщо відомо розподілення поля  $E_m(r)$  в області  $\sigma_m$ .

Не дивлячись на те, що формули (2.10.) та (2.11.) співпадають за зовнішнім виглядом, реєстраційні сигнали на приймальній апертурі у випадку дифузної та дзеркальної поверхні об'єкта мають різний характер, як і результати їх обробки. Характер відбиття ні впливає також на статистичну характеристику поля або інтенсивності сигналу.

При дифузному відбитті у формуванні поля сигналу приймає участь багато точок відбиття, а амплітуда кожної є випадковою. Тому, згідно центральній граничній теоремі, поле випромінювання, відбитого від дифузної поверхні, підлягає гауссівській статистиці.

При відбитті від дзеркальної поверхні внесок у поле відбитого сигналу дає головним чином обмежене число дзеркальних областей. У цьому випадку поле відбитого сигналу не можна вважати гауссівським. Встановлено, що лише при числі дзеркальних областей завбільшки за шість відбитий сигнал набуває гауссівську статистику [37].

У теорії оптичної локації переважають дві моделі сигналу на фотоприймачеві, що описують його амплітудно-часове розподілення: квантова та аналітична.

Області застосування тої чи іншої моделі у залежності від рівня вхідного сигналу, фонових засвітлювань, інерційності лишаються нез'ясованими. Природно, при описанні сигналів у системах ближньої дії, в яких існують жорсткі обмеження за рівнем потужності випромінювання та порогової чутливості, стає задача по оцінці сигналу на фотоприймачі [38].

Існує ряд рівнянь оптичної локації, що характеризують зміну щільності потоку енергії у напрямку приймального пристрою.

Якщо у якості міри цієї залежності прийняти коефіцієнт відбиття, що характеризує відношення повної

потужності, відбитої від об'єкта, до падаючої, то рівняння оптичної локації має вигляд [27]

$$P_{ex} = P_o \rho S_{ex} \kappa_{np} f_c(\theta_3) / 2\pi \ell^2,$$

де  $P_o$  – потужність джерела випромінювання;

$\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні;

$S_{ex}$  – площа вхідного вікна приймального блока;

$\theta_3$  – кут між нормаллю і напрямком поверхня–приймач;

$\kappa_{np}$  – коефіцієнт пропускання оптичної системи;

$\ell$  – вимірювана дальність.

У далекомірних оптико-локаційних пристроях (ОЛП) при амплітудному методі вимірювання дальності розкид коефіцієнта відбиття реальних поверхонь від 0,04 до 0,89 визначає пропорційну його величині значну похибку вимірювань [27].

У неамплітудних методах дальнометрії також існують просторові області накладення відбивних властивостей поверхні на локаційний сигнал.

Вплив коефіцієнта відбиття поверхні зондування на точність вимірювань в оптичній локації визначає актуальність вимірювання його кількісного рівня.

Шляхом додавання функції вимірювання коефіцієнта відбиття поверхні і використання додаткової інформації для збільшення точності далекомірних вимірювань здійснюється розширення можливостей далекомірного ОЛП [39].

Робоча область далекомірного ОЛП, заснованого на базовому методі вимірювання, обмежується областю перетину діаграм спрямованості приймально-випромінювальних елементів.



В межах робочої області вимірювана дальність  $l$ , виходячи з рівняння оптичної локації, визначається як

$$l = \sqrt{A\rho/U}, \quad (2.12.)$$

де  $\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні,

$U$  – локаційний сигнал,

$A$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує незалежні від дальності параметри ОЛП і середовища поширення випромінювання.

Абсолютна похибка вимірювання дальності, викликана розкидом значень  $\rho$ , визначається як  $\Delta l = \sqrt{\Delta\rho}$ .

Наприклад, при  $\Delta\rho = \rho_{\max} - \rho_{\min} = 0,85 - 0,10 = 0,75$  абсолютна похибка  $\Delta l \approx 0,87l$ . Очевидно, що при зміні коефіцієнта відбиття від максимальної  $\rho_{\max}$  до мінімальної  $\rho_{\min}$  величини значення  $l$  зменшується, що складає похибку вимірювання дальності. Цей факт пропонується використати в координатному методі вимірювання  $\rho$ .

Встановлено [40, 41], що в далекомірних ОЛП базового типу координата  $a_3$  центру світлової плями на фоточутливому майданчику приймача визначається оптико-геометричними параметрами вимірника, приведеними на рисунку 2.2, таким чином

$$a_u = \frac{bf(l \ l_{\partial n})}{l \ l_{\partial n} \ b \ tg\gamma(l \ l_{\partial n})}. \quad (2.13.)$$

Згідно рівнянню (2.13.) розраховуються координати  $a_u(\rho_{\max})$  і  $a_u(\rho_{\min})$ , відповідні пороговій дальності  $l_n$  при максимальному і мінімальному значенні  $\rho$ .

Таким чином, рівняння (2.13) дозволяє встановити координатні границі діапазону зміни  $\rho$ , в межах яких

можна вимірювати коефіцієнт відбиття в ОЛП базового типу.

Отже, на поверхні фотоприймача може бути виділена область, відповідна зміні коефіцієнта відбиття поверхні локації.

Коефіцієнт відбиття поверхні, виходячи з (2.12.), визначається як

$$\rho = Ul^2 / A, \quad (2.14.)$$

З (2.13) залежність  $l$  від  $a_u$  має вигляд:

$$l = \frac{bl_{\partial n} (a_3 \operatorname{tg}\gamma + f)}{a_3 (l_{\partial n} b \operatorname{tg}\gamma) - bf}. \quad (2.15.)$$

Прямий зв'язок між  $\rho$  і  $a_3$  встановлюється при підстановці (2.15) в (2.14):

$$\rho = \frac{U}{A} \left[ \frac{-bl_{\partial n} (a_3 \cdot \operatorname{tg}\gamma + f)}{a_3 (l_{\partial n} b \operatorname{tg}\gamma) - bf} \right]^2 \quad (2.16.)$$

Розрахункова характеристика  $\rho(a_u)$  одержана для макету ОЛП з габаритними параметрами  $b = 75$  мм,  $f = 50$  мм,  $l_{\partial n} = 70$  см,  $\operatorname{tg}\gamma = b / 2l_{\partial n} = 5,36 \cdot 10^{-7}$  у діапазоні  $\rho$  від 0,85 до 0,10 при  $l_{n \max} = 100$  см.

Величина відношення  $\frac{U}{A} = \frac{\rho_{\max}}{l_{n \max}^2}$  складає  $0,85 \text{ м}^{-2}$

і є постійним множником в рівнянні (2.16) для даного макету ОЛП.

Дані розрахунку представлені на рисунку 2.4 і в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

$\rho$	0,85	0,77	0,62	0,50	0,42	0,35	0,30	0,23	0,18	0,14	0,12	0,08
$a_u$ , мм	1,6	1,5	1,0	0,5	0	-0,5	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-5,0	-7,0

На рисунку 2.4 ( $+a_u$ ) – значення ліворуч, ( $-a_u$ ) – значення праворуч від оптичної осі приймального об'єктива.

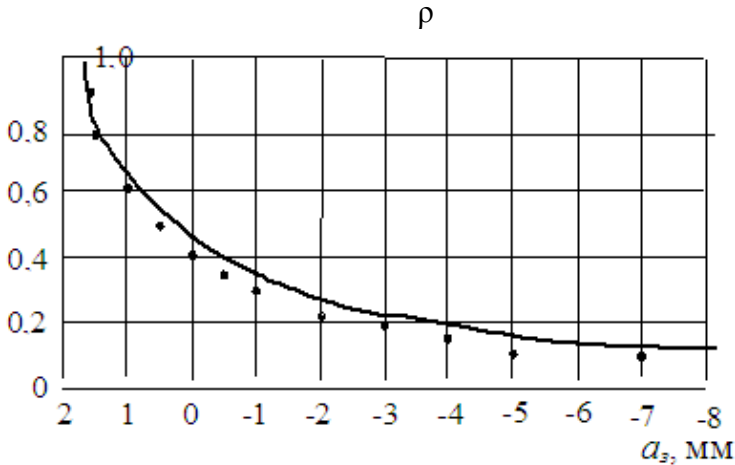


Рисунок 2.4. Розрахункова характеристика  $\rho(a_u)$ .

Конструктивне виконання оптичного вузла ОЛП показано на рисунку 2.5, де майданчик фотоприймача 1 затінений щільною растрових ґрат 2.

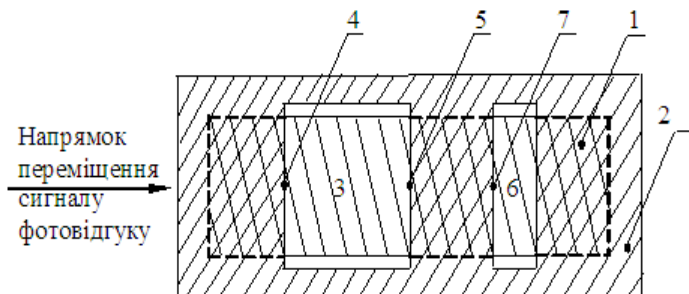


Рисунок 2.5. Структура растрових ґрат

Щілина 3 розрахована на прийом сигналу в межах від максимально видаленої точки зони перетину полів зору приймача і випромінювача (кромка 4) до крапки усередині зони, відповідної прийому сигналу від поверхні з мінімальним коефіцієнтом відбиття (кромка 5).

Непрозорий сектор між щілинами 3 і 6 розділяє просторові області вимірювання коефіцієнта відбиття поверхні і відстані до неї. Ширина щілини 6 нормується діапазоном вимірюваних дальностей і обмежується мертвою зоною з боку малих відстаней.

Щілина 3 в структурі ґрат охоплює область можливих змін коефіцієнта відбиття поверхні. Ширина щілини  $l_u$  визначається виразом

$$l_u = a_u(\rho_{\max}) - a_u(\rho_{\min}). \quad (2.17.)$$

Визначивши за допомогою (2.13) вирази  $a_u$  для порогової дальності при максимальній відбивній здатності

$l_{n \max}$  і пороговій дальності при мінімальній відбивній здатності  $l_{n \min}$  і підставивши їх у (2.17), одержимо

$$l_{ц} = \frac{bf(l_{n \max} \quad l_{\partial n})}{l_{n \max} l_{\partial n} \quad btgy(l_{n \max} \quad l_{\partial n})} \cdot \frac{bf(l_{n \min} \quad l_{\partial n})}{l_{n \min} l_{\partial n} \quad btgy(l_{n \min} \quad l_{\partial n})}. \quad (2.18.)$$

Методика розрахунку величини  $l_{ц}$  така.

Визначаються координати фокальної плями, проєктованої на фотоприймач при двох значеннях дальності –  $l_{n \max}$  ( $\rho \sim 0,85$ ) і  $l_{n \min}$  ( $\rho \sim 0,10$ ).

Порогова дальність  $l_n$  визначається експериментально або розраховується з рівняння оптичної локації (2.12) як

$$l_n = \sqrt{A\rho/U_n},$$

де  $U_n$  – пороговий локаційний сигнал.

Якщо, наприклад,  $l_{n \max} = 100$  см при  $\rho_{\max} \sim 0,85$ , то  $l_{n \min} = 35$  см при  $\rho_{\min} \sim 0,10$ . При цьому співвідношення між пороговою дальністю при крайніх значеннях коефіцієнта відбиття має наступний вигляд:

$$\frac{l_{n \max}}{l_{n \min}} = \sqrt{\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}}}.$$

Потім, відповідно до рівняння (2.13.), проводиться розрахунок координат центру фокальної плями для названих дальностей.

Для даного макету ОЛП координати центру фокальної плями:

$$a_u(l_{n \max}) = 1,6 \text{ мм}; \quad a_u(l_{n \min}) = -5,4 \text{ мм}.$$

Це значить, що зміна порогової дальності залежно від відбивних властивостей поверхні об'єкту еквівалентна переміщенню фокальної плями між координатами 1,6 і (-5,4) мм. При цьому довжина траєкторії переміщення складає 7,00 мм, що визначає ширину щілини 3 між кромками 4 і 5.

Вимірювання  $a_z$  в межах щілини 3 проводиться за допомогою координатного фотоприймача, що дозволяє по вихідному сигналу визначати координати світлової плями на фоточутливій поверхні.

Сучасні лінійні багатоелементні фотоприймальні структури, призначені для прецизійних (точність вимірювань 0,1...0,5 %) лінійних вимірювань, складаються з елементів, довжина і ширина яких складає від 15 до 100 мкм, а їх число на міліметр чутливої поверхні досягає 30 [42]. Очевидно, що роздільна здатність лінійних фотоприймальних структур дозволяє здійснити високоточні вимірювання координати в діапазоні 0...7 мм

Величина непрозорої зони між щілинами 3 і 6 визначається наступним виразом:

$$l_{\text{нпр}} = \frac{bf(l_{n \min} \quad l_{\text{дн}})}{l_{n \min} \quad l_{\text{дн}} \quad btg\gamma(l_{n \min} \quad l_{\text{дн}})} \quad \frac{bf(l_{\text{е}} \quad l_{\text{дн}})}{l_{\text{е}} \quad l_{\text{дн}} \quad btg\gamma(l_{\text{е}} \quad l_{\text{дн}})},$$

де  $l_{\text{е}}$  – мінімальна або фіксована вимірювана дальність.

Аналогічно ширину непрозорої пелюстки решітки від кромки 5 до кромки 7 визначає довжина траєкторії зсуву фокальної плями, відповідної зміні дальності від  $l_{n \min}$  до  $l_{\text{е}} = 30$  см, що складає 1,7 мм.

В процесі вимірювання дальності в межах щілини 6 можна використовувати заздалегідь зміряний в межах щілини 3 коефіцієнт відбиття поверхні  $\rho$ . Кількісне визначення  $\rho$  дозволяє позбавити амплітудний метод

оптичної дальнометрії, представлений рівнянням (2.12.), від найзначнішої похибки. Таким чином, шляхом введення растрових ґрат розрахункової структури забезпечується реалізація додаткової функції вимірювання коефіцієнта відбиття, що дозволяє понизити похибку далекомірних вимірювань.

У якості основи для визначення оптимальної структури приймача звичайно використовується критерій відношення правдоподібності із теорії статистичних рішень, який являє собою відношення щільності імовірності підрахунку електронів для суміші сигнал-завада і тільки завади [43].

Рішення про наявність сигналу приймається в результаті порівняння цього відношення з пороговою величиною. При невиконанні цієї умови приймається рішення про відсутність сигналу. Якість приймальної системи характеризується імовірністю правильного виявлення сигналу  $D$  та хибної тривоги  $F$ :

$$D = \int_{\varepsilon}^{\infty} p_{c+u}(z) dz, \quad F = \int_{\varepsilon}^{\infty} p_u(z) dz,$$

де  $z$  – напруга сигналу;

$p_{c+u}(z)$  – щільність імовірності суміші сигнал-завада;

$p_u(z)$  – щільність імовірності завади;

$\varepsilon$  – порогове значення  $z$ .

Процедура оптимальної обробки сигналу базується, таким чином, на використанні статистичних характеристик сигналу, завади, а також на їх суміші на виході фоточутливого елемента.

Практичний інтерес уявляє аналіз характеристик

фотоприймача для слабкого та сильного сигналів.

У першому випадку на часовому інтервалі спостерігається декілька окремих фотоелектронів сигналу. Пристрій обробки при прийомі таких слабких сигналів працює в режимі лічби. В даному режимі в явній формі проявляється квантова структура сигналу.

Оптимальна схема обробки повинна містити інтегратор, тому що повинен здійснюватися підрахунок числа фотоелектронів сигналу і завади у кожному із ряду елементарних часових інтервалів, їх підсумування та порівняння з пороговим значенням.

В режимі сильного сигналу сигнали від окремих фотоелектронів перекриваються і на виході відтворюється об'єднана сигналу. Подальша обробка аналогічна оптимальній обробці в електронному тракті локаційних пристроїв. Таким чином, статистична обробка оптичних сигналів має ряд специфічних особливостей, пов'язаних з квантовою структурою оптичного поля.

Розроблений модифікований метод оптико-локаційних вимірювань дальності забезпечує обґрунтування цифрової обробки зашумленого вимірювального і опорного сигналів

Відомо [22, 44], що у аналогових вимірювачів різниці фаз (фазових детекторів) мінімальний вимірюваний зсув фаз  $\Delta\varphi_{\min}$  складає  $0,5^\circ$ . У цифрових фазових детекторів  $\Delta\varphi_{\min} = 0,04^\circ$ . Порівняння розрахункових значень  $\Delta\varphi_{\min}$  з характерними для різних фазових детекторів показує, що вимірювання у заданому режимі обмежуються тільки роздільною здатністю фазореєструючих пристроїв.

Максимальною точністю вимірювання дистанцій володіють фазові методи, засновані на вимірюванні фазових співвідношень між випромінюючим і відбитим оптичними сигналами, які забезпечують вимірювання дистанцій з похибкою в декілька міліметрів. Зразком



досягнутого технічного рівня є портативний прилад типу «лазерна рулетка», використовуваний при виконанні будівельних робіт і призначений для проведення лінійних вимірювань від 0 до 20 м з точністю порядку 1 мм [45].

Найбільше застосування фазові методи знайшли в геодезичних і навігаційних системах для вимірювань в дальній зоні, де час точних вимірювань не обмежується динамікою взаємного розташування вимірника і досліджуваного об'єкту.

Перенесення фазового методу в швидкісні далекомірні системи малих дистанцій сформуло проблему забезпечення високої точності при значному обмеженні часу вимірювань. Так, наприклад, точність вимірювань порядку 1 % для дистанцій менше 1 м відповідає декільком міліметрам. При швидкості руху вимірника порядку 50 м/с такий лінійний відрізок долається за 20 мкс, що визначає час вимірювання дистанції із заданою похибкою.

Засоби вимірювання фазового зсуву, засновані на вимірюванні часу між точками переходу через нуль досліджуваних сигналів, коли про фазовий зсув судять по положенню лише двох точок, не використовують того об'єму інформації, який несуть всі останні точки синусоїди.

По відношенню до цих засобів кореляційний засіб вимірювання фази збільшує кількість оброблюваної інформації, в наслідок чого володіє максимальною перешкодостійкістю та не залежить від спотворень форми досліджуваних сигналів.

З метою одержання лінійної залежності значення вимірюваної дистанції від фазового зсуву застосовується цифровий фазометр з перекриттям. Фазометри з перекриттям реалізуються за допомогою перетворення формувальними пристроями вхідних сигналів у

прямокутні імпульси, тобто шляхом обмеження вхідних сигналів та приведення сформованих імпульсів до логічних рівнів. Ці імпульси подаються на логічну схему „Виключне АБО”, на виході якої формується послідовність прямокутних імпульсів з тривалістю, пропорційною фазовому зсуву.

Кореляційні методи вимірювання фазового зсуву реалізують зв'язок між взаємно кореляційною функцією  $\mu_{1,2}$  двох гармонічних сигналів з амплітудами  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$  та їх фазового зсуву [46]

$$\mu_{1,2} = 2^{-1} U_{m1} U_{m2} \cos \varphi, \quad (2.19.)$$

де  $\varphi$  – фазовий зсув.

$\Delta\varphi$  визначається із (2.19.)

Формула справедлива при взаємно некорельованих шумах і відсутності у складі сигналів гармонік. У цьому випадку при відомих амплітудах сигналів  $U_{m1,2}$  фазовий зсув  $\Delta\varphi = \arccos 2\mu_{1,2} / U_{m1} U_{m2}$ .

При вимірюванні фазового зсуву амплітуди сигналів  $U_{m1,2}$  визначають через дисперсію сигналів  $\sigma_{1,2}^2 U_{m1,2}^2 / 2$ . При цьому

$$\Delta\varphi = \arccos \mu_{1,2} / \sigma_1 \sigma_2 = \arccos R_{1,2}, \quad (2.20.)$$

де  $R_{1,2}$  – нормована взаємно кореляційна функція вимірюваних сигналів.

Недолік кореляційних фазометрів, що реалізують (2.20), пов'язаний з появою систематичних похибок у випадку вимірювання фазового зсуву сигналів при наявності шуму.

Для зашумлених сигналів дисперсія

$$\sigma_{1,2}^2 = U_{m1,2}^2 / 2 + \sigma_{ш1,2}^2,$$

де  $\sigma_{1,2}^2$  — дисперсія флукуаційної частини адитивної суміші гармонічного сигналу та шуму.

У цьому випадку вимірний фазовий зсув

$$\Delta\varphi_{вим} = \arccos[\cos\sqrt{(1+1/q_1^2)(1+1/q_2^2)}], \quad (2.21.)$$

де  $q_{1,2} = U_{m1,2} / \sqrt{2\sigma_{ш1,2}}$  — відношення сигнал-шум, а систематична похибка вимірювання

$$\Delta\varphi_{сист} = \varphi_{вим} - \varphi, \quad (2.22.)$$

де  $\varphi_{вим}$  визначається із (2.21).

При аналізі систематичної похибки вимірювання фазового зсуву сигналів оптичного далекоміра, що аналізуються, необхідно ураховувати, що  $q$  (відношення сигнал-шум) не є постійною величиною та залежить від поточної дистанції. Звідси відношення сигнал-шум вимірювального каналу

$$q_1 = k \frac{1}{l^2},$$

де  $k$  — постійна величина, залежна від енергетичних параметрів оптичного далекоміра,

$l$  — дистанція.

Якщо  $q_2$  — відношення сигнал-шум опорного каналу, що прямує до нескінченності, то підставляючи вирази  $q_1$  і  $q_2$  послідовно в (2.3) та (2.22) одержимо:

$$\Delta\varphi_{\text{сум}} = \arccos(\cos \varphi \sqrt{1 + l^4 / k_1^2}) - \varphi. \quad (2.23)$$

В процесі синтезу ОЕД використовуються системи кризного проектування радіоелектронних систем Design Lab 8.0 і ORCad 9. Для автоматизації аналізу взаємодії компонентів ОЕД розроблена модель оптичного каналу методами пакету комп'ютерного моделювання. В основу моделі закладається використання електричної лінії затримки без втрат, чим забезпечуються часові співвідношення, еквівалентні розповсюдженню оптичного випромінювання, характеристики якого поставлені у відповідність електричним сигналам.

Моделювання дозволяє провести оцінку характеристик оптико-електронних компонентів і оптичних систем, властивостей середовища і заводових дій, дослідження схемного рішення ОЕД і його поведінки в динамічному режимі. Такий підхід відкриває можливість виявлення відхилень в роботі пристрою і усунення їх причин.

Синтез оптичного випромінювача проводиться у напрямі досягнення високої міри лінійності (відсутність значних гармонійних спотворень) у формі модуляції сигналу. Підбором елементів схеми одержується максимальний розмах змінної складової струму через випромінювач за умови роботи на лінійній ділянці вольтамперної характеристики.

Потужність випромінювача регламентується відбивними властивостями поверхні об'єкту. Це визначає генерацію рівня потужності, достатнього для реєстрації

відбитого сигналу по всьому діапазону відстаней, тобто сигналу, що перевищує порогову чутливість ФП.

Захист фотоприймача від низькочастотних і постійних завадових засвічень забезпечується включенням його безпосередньо у вхідний контур підсилювача, зашунтований індуктивністю. Нульовий фазовий зсув сигналу в підсилювачі досягається шляхом настройки вхідного і вихідного контурів на частоту модуляції.

Певні складнощі по електромагнітній сумісності випромінювального і приймального блоків виникають унаслідок відношення їх сигналів, перевищуючого 100 дБ, неможливості часового розділення сигналів і розміщення в одній конструкції.

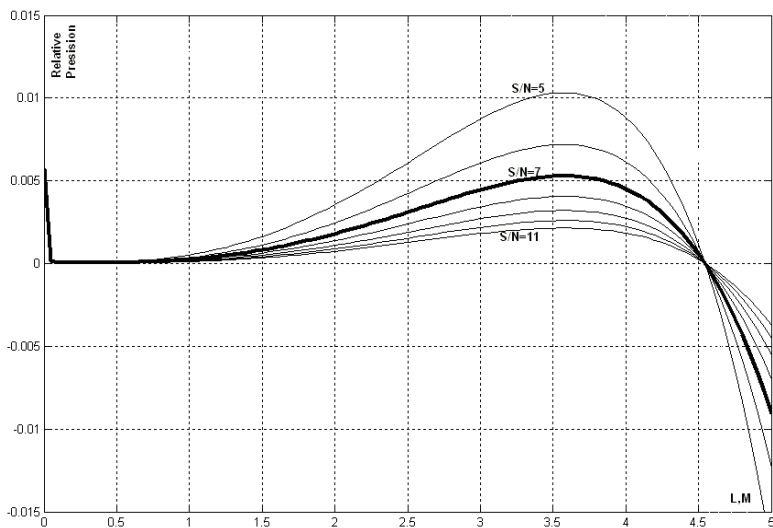
Найкритичнішим є наведення електричного сигналу випромінювача, порівнянного по рівню з сигналом фотоприймача, на вхід підсилювача оптичного сигналу. Це призводить до зміни фази сигналу і збільшення похибки вимірника. Застосуванням у вхідних ланцюгах відповідних напівпровідникових елементів вдається знизити шумовий поріг підсилювача, що визначає інтегральну чутливість ОЕД, не обмежену шумами.

Встановлено, що паразитні зв'язки елементів конструкції є комбінацією індуктивних і ємнісних зв'язків, з яких найзначнішими є індуктивні. Зменшення паразитних індуктивних зв'язків забезпечується за рахунок багаторівневого екранування конструкційних елементів і жорсткої електромагнітної розв'язки електричних ланцюгів живлення і сигналів управління.

Розрахунки систематичної похибки оптичного далекоміра згідно з (2.5) у програмному середовищі MatLab 6,5 у діапазоні вимірюваних дистанцій 0...5 м наведені на рисунку 2.6.

Очевидно, що систематична похибка вимірювань оптичного далекоміра у залежності від співвідношення

сигнал-шум та вимірюваної дистанції має знаковмінний характер. Крім того, ця похибка не носить випадковий характер і залежить тільки від відношення величина сигналу до величини шуму, тобто при відомому значенні даного співвідношення її можливо завжди розрахувати та ввести в результат вимірювання необхідну поправку, що реалізується у подальшому у програмному середовищі обчислювача.



**Рисунок 2.6. Системна похибка оптичного далекоміра**

Таким чином, для одержання точності вимірювання дистанції не гірше 1 % співвідношення сигнал-шум  $S/N$  на виході блока фотоприймача повинно бути не менш 7. Розрахунок частотних характеристик частотно-залежних ланцюгів модернізованого вимірювача проводиться за допомогою моделювання у середовищі PSpice пакета програм ORCAD.

Визначені оптимальні смуги пропускання вхідних селективних підсилювачів вимірювального та опорного каналів по спеціально розробленій ітеративній методиці. При цьому, завдяки можливостям моделювальної програми та сучасним обчислювальним потужностям за один крок ітерації розраховуються частотні діапазони селективних підсилювачів, пов'язані з ними рівні шумів та температурні нестабільності фазочастотних характеристик.

На кожному наступному кроці ітерації коректуються смуги пропускання селективних підсилювачів з метою знаходження їх оптимальних значень. При дуже вузьких смугах пропускання зростає похибка від температурної нестабільності фазочастотної характеристики. При широких смугах зростає похибка, обумовлена шумами фотоприймача та першого каскаду підсилювача.

Розраховане значення середньоквадратичного відхилення шумового сигналу використовується для обчислення відношення сигнал-шум

$$\sigma_{u \text{ вих}} = \sqrt{\int_{u \text{ вих}} (f) df},$$

де  $\sigma_{u \text{ вих}}$  — середньоквадратичне відхилення вихідної (для селективних каскадів) та вхідної (для каскадів кореляційної обробки) напруги шуму,

$S_{u \text{ вих}}(f)$  — спектральна щільність шумового сигналу на виході селективних підсилювачів,

$f$  — частота.

Величина  $\sigma_{u \text{ вих}}$  та мінімально припустиме значення відношення сигнал-шум (2.5) однозначно визначають мінімальне значення сигналу на виході

селективних блоків.

Максимальне значення сигналу на цьому виході визначається за паспортними даними використаних електронних та радіоелементів.

З цих даних визначається динамічний діапазон вимірювального сигналу.

Динамічний діапазон оптичного сигналу на вході фотоприймача визначається при наступних значеннях:

дальності дії –  $L_{\max} = 5 \text{ м}$  та  $L_{\min} = 0,3 \text{ м}$ ,

коефіцієнтів відбиття –  $\rho_{\max} = 0,95$  та  $\rho_{\min} = 0,1$ ,

кута падіння  $\varphi_{\max} = 60^\circ$  як

$$D_{\text{опт.сигн}} = \left( \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \right)^2 \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} \frac{1}{\cos_{\max}} \approx 79 \text{ dB}.$$

Це визначає необхідний динамічний діапазон системи автоматичного регулювання підсилювача оптичного випромінювача.

$$D_{APY} = D_{\text{оптсигн}} \quad D_{\text{сигн}} = 27 \text{ dB}$$

Для реалізації модифікованого методу локаційних вимірювань проведений аналіз необхідних функцій і параметрів керувального мікроконтролера.

Мікроконтролер здійснює наступні функції.

1. Аналого-цифрове перетворення вхідних вимірювальних сигналів з узгодженням їх динамічних діапазонів з параметрами АЦП.

Метод вимірювання та задана точність визначають розрядність АЦП не менш 12-ти розрядів, а час перетворення – не більше  $10^{-4}$  с.



2. Керування потужністю випромінювання, що зондує. Звуження динамічного діапазону рівня приймального сигналу до 40 дБ потребує розбиття рівня вихідної потужності на два фіксованих значення 0 дБ та 40 дБ, що реалізується через однорозрядний порт виводу.

3. Автоматичне балансування тракту підсилення постійного струму (ППС) вимірювача здійснюється за допомогою 10-ти розрядного АЦП з паралельним портом виводу, а також однорозрядного порту виводу, що відключає задавальний генератор.

4. Оцінка порогового рівня прийнятого вхідного сигналу не менш – 40 дБ потребує у складі мікропроцесора наявності аналогового компаратора.

5. Лінеаризація дистанційних характеристик вимірювача дальності, що вимагає наявності у складі мікроконтролера енергонезалежного багатократно перепрограмованого запам'ятовуючого пристрою (ПЗП) даних розрядністю 1,0 кБайт.

6. Організація зв'язку з зовнішньою ЕОМ вимагає наявності у складі мікроконтролера універсального синхронно/асинхронного (USART) прийомо-передавача.

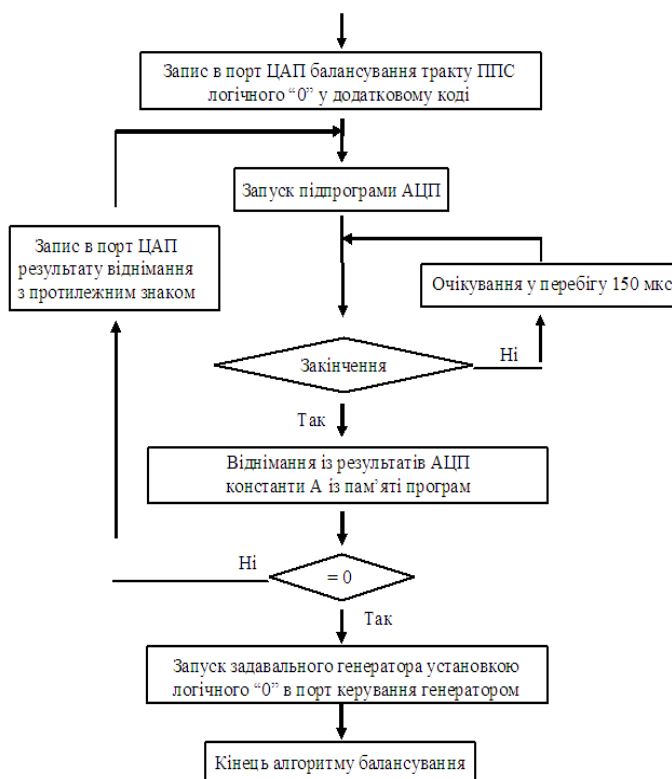
7. Індикація режимів і результатів вимірювання. Для виводу інформації потрібно 16 знакоміць з індикацією букв російського і латинського алфавітів, цифр і спеціальних символів. Мікроконтролер повинен мати 8-розрядний порт вводу-виводу для організації обміну даними з багатофункціональним РКІ- дисплеєм.

8. Обслуговування 4-кнопкового пристрою вводу початкових даних вимагає 4-х розрядів порту вводу.

9. Наявність можливості внутрішньо системного програмування енергонезалежної багатократно програмованої пам'яті програм по послідовному інтерфейсу від зовнішньої ЕОМ з метою налагодження програмного забезпечення (ПЗ), що використовується.

Здійснена програмна модернізація стандартних для даної сім'ї мікроконтролерів програмних модулів, що входять до складу кризного керувального алгоритму високого рівня. Такими структурними і алгоритмічними можливостями володіють 16-ті розрядні мікроконтролери "Atmel" з внутрішньою архітектурою типу AVR.

Нестандартний алгоритм автоматичного балансування тракту ППС представлений у вигляді блок-схеми на рисунку 2.7.



**Рисунок 2.7. Алгоритм автоматичного балансування тракту ППС вимірювача**

Для реалізації даного алгоритму на апаратному рівні здійснюється узгодження коефіцієнтів перетворення ЦАП та АЦП, близьке до “1”. Цим досягається збіжність даного алгоритму за мінімальну кількість циклів функціонування.

Розроблено та налагоджено внутрішньо системний інтерфейс послідовного зв'язку AVR мікроконтролерів з зовнішньою ЕОМ. Мікроконтролери AVR сім'ї Mega є 16-розрядними мікроконтролерами з RISC-архітектурою [47,48]. Вони мають електричну пам'ять, що стирається, програм (FLASH) та даних (EEPROM), а також різні периферійні пристрої. Мікроконтролери сім'ї Mega мають найбільш багатий набір периферійних пристроїв у порівнянні з мікроконтролерами інших сімей.

AVR-ядро базується на вдосконаленій RISC-архітектурі, з регістровим файлом швидкого доступу, що містить 32 регістри загального призначення, безпосередньо пов'язаних з арифметико-логічним пристроєм (ALU), і могутньою системою команд. За один тактовий цикл з регістрового файлу виконується команда і результат записується в регістр призначення.

Така високоефективна архітектура забезпечує продуктивність майже вдесятеро більшу, ніж стандартні CISC мікроконтролери.

Відмінні особливості:

- Використовується AVR розширена RISC-архітектура.
- Великий набір із 121 команд, більшість яких виконується за один машинний цикл.
- Місткість внутрішньосистемної програмованої Flash пам'яті складає 16 Кбайт, 1000 циклів стирання/запису.
- SPI-інтерфейс внутрішньосистемного програмування.
- Місткість вбудованої EEPROM складає 2 Кбайт, 100000 циклів стирання/запису.

- Вбудована RAM місткістю 4 Кбайт.
- 32 16-розрядні регістри загального призначення, набір регістрів управління периферією.
- 32 програмовані лінії I/O, 16 ліній виходу, 16 ліній входу.
- Програмовані послідовні UART- і SPI-інтерфейси.
- Діапазон напруг живлення від 2,7 до 5,5 В.
- Діапазон тактових частот від 0 до 4 МГц.
- Продуктивність до 16 MIPS при частоті 12 МГц.
- Вбудована система реального часу з окремим генератором.
- Два 8-розрядні таймери/лічильники з ШІМ.
- 16-розрядний таймер/лічильник з режимами захвату/порівняння і подвійним ШІМ з розрядністю 8, 9 або 10 розрядів.
- Програмований сторожовий таймер з вбудованим генератором.
- Вбудований аналоговий компаратор.
- 8-канальний 10-розрядний аналого-цифровий перетворювач.
- Режими енергозбереження Idle, Power Save і Power Down.
- Програмна установка тактової частоти.
- Програмне блокування захисту програмних засобів.

Мікроконтролери ATmega16 мають в своєму розпорядженні наступні можливості:

- 16Кбайт внутрішньосистемно програмованої Flash пам'яті програм,
- 2/4 Кбайт EEPROM даних,
- 4 Кбайт SRAM даних,
- 32 лінії I/O загального призначення,
- 8 ліній входу,
- 8 ліній виходу,
- 32 робітника регістра загального призначення,
- 4 гнучкі таймери/лічильники з режимами порівняння,

- PWM і UART, програмований сторожовий таймер з вбудованим власним генератором,
- послідовний SPI порт,
- три програмно встановлюваних режими енергозбереження.

У режимі Idle зупиняється центральний процесор, але продовжують працювати SRAM, таймери/лічильники, порт SPI і система переривань. У режимі Power Down зберігається вміст регістрів, але зупиняється тактовий генератор і до надходження сигналу переривання або апаратного скидання забороняється виконання всіх функцій мікроконтролера. У режимі Power Save всі пристрої знаходяться в режимі «сну», але генератор таймера продовжує працювати, забезпечуючи збереження часової бази. Прилади виготовляються за технологією незалежної пам'яті фірми Atmel. Вбудована ISP Flash-пам'ять програм перепрограмується безпосередньо в системі, з використанням послідовного SPI-інтерфейсу, або за допомогою програматорів незалежної пам'яті.

Об'єднавши 8-розрядне RISC CPU з внутрішньосистемно програмованою Flash-пам'яттю великого об'єму, фірма створила сім'ю могутніх мікроконтролерів, що забезпечують реалізацію недорогих і дуже зручних рішень для великої кількості вбудовуваних застосувань. Сімейство ATmega16 підтримується великою кількістю засобів розробки програм і систем, що включають: C-компілятори, внутрішньосхемні емулятори і налагоджувальні пристрої. В процесі розробки оптико-електронного далекоміра одержані програмні модулі, що забезпечують всі необхідні функції та можливі режими роботи вимірального приладу. Завершальним етапом створення програмного забезпечення вимірника є компіляція завантажуваного коду, здатного автономно

функціонувати з екземпляром апаратної частини приладу. Для цього вирішуються наступні задачі:

1) Здійснюється оптимальна взаємна адресація програмних модулів та їх розміщення в ЕПРОМ мікропроцесора.

2) Відпрацьовується поведінка приладу в особливих режимах:

- „зависання” приладу і „м'який” вихід з них,
- плавний розряд батарей і можливість програмних збоїв, пов'язаних з цим.

Автономна програма функціонування мікроконтролера вимірника відстані завантажується в прилад за допомогою спеціального програматора або персонального комп'ютера за допомогою порту вводу-виводу. Подальший розвиток програмного забезпечення з метою додавання призначених для користувача функцій передбачає компілювання коду нової версії програмного забезпечення і завантаження у вимірювальний прилад цілком. Процедура оновлення програмного забезпечення строго регламентується і включається в інструкції користувача приладу.

Рециалізація або так зване “скидання” переводить мікроконтролер в певний стійкий стан. Скидання може бути викликано наступними подіями:

- включення напруги живлення мікроконтролера;
- подача сигналу низького рівня на виводи „RESET” (апаратне скидання);
- тайм-аут сторожового таймера;
- падіння напруги живлення нижче заданої величини;
- скидання по інтерфейсу JTAG.

При настанні будь-якої з перерахованих подій у всі регістри вводу/виводу заносяться їх початкові значення, а в лічильник команд завантажується значення адреси вектору скидання. За цією адресою повинна знаходитися

команда безумовного переходу (RJMP) на початок програми. Логіка скидання мікроконтролера наступна.

При настанні події, що приводить до скидання мікроконтролера (наприклад, апаратне скидання по критеріях нештатної поведінки електронних ланцюгів), формується внутрішній сигнал скидання.

Одночасно запускається таймер формування затримки скидання. Після закінчення певного проміжку часу внутрішній сигнал скидання знімається і починається виконання програми.

Мікроконтролер сімейства AVR Mega дозволяє визначити подію, в результаті якої відбувається скидання пристрою. Для цієї мети використовується регістр управління і стан мікроконтролера MCUCSR. Цей регістр також містить набір прапорів, стан яких залежить від причини, що викликала скидання пристрою.

У приладі передбачається можливість аналізу джерела останнього скидання, що відбулося. При будь-якому початку виконання автономної програми функціонування мікроконтролера відбувається 5-секундна індикація на дисплеї приладу слова, що ідентифікує причину, яка викликає скидання:

TIM – скидання від сторожового таймера;

POW RES – скидання по зниженню живлення;

APP RES – апаратне скидання;

ON RES – скидання по включенню живлення.

В оптико-електронному пристрої використовується рідкокристалічний індикатор (PKI) з вбудованим контролером, що полегшує реалізацію інтерфейсу PKI і мікропроцесора. AVR мікроконтролер посилає в PKI команди (табл. 3.2), що управляють режимами його роботи, і ASCII-коди символів, що виводяться.

У свою чергу, PKI посилає AVR-мікроконтролеру по його запиту інформацію про свій стан і дані зі своїх

внутрішніх блоків пам'яті.

Опис виводів стандартного роз'єму PKI на базі HD44780:

1- VSS (-) Живлення. 0 V.

2 -VDD (+) Живлення.+5V.

3 -V0 Напруга зсуву, що керує контрастністю.

4 - RS Вхід. Високий рівень – Дані. Низький – Команди.

5 - R/W Вхід. Високий - Читання, Низький – Запис.

6 - E Вхід. Строб, супроводжуючий сигнали на шині "команди/дані".

7- DB0.

8- DB1.

9- DB2.

10- DB3.

11 - DB4.

12 -DB5.

13- DB6.

14 -DB7. Шина "команди/дані"

Три виводи 14-контактного рознімання призначені для подачі напруги живлення і напруги зсуву, яка управляє контрастністю дисплея.

На рисунку 2.8 показана схема, що управляє контрастністю дисплея.

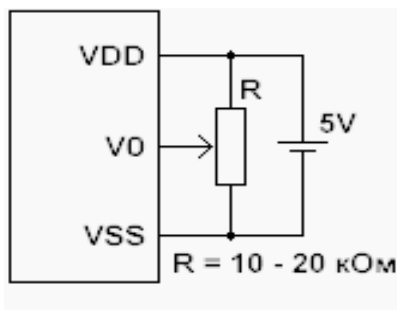


Рисунок 2.8. Схема управління контрастністю дисплея



На рисунку 2.9 зображені часові діаграми цих сигналів при запису команд/даних у контролер РКІ.

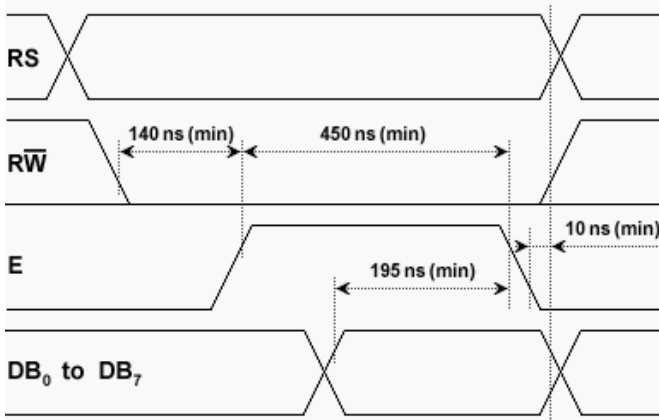
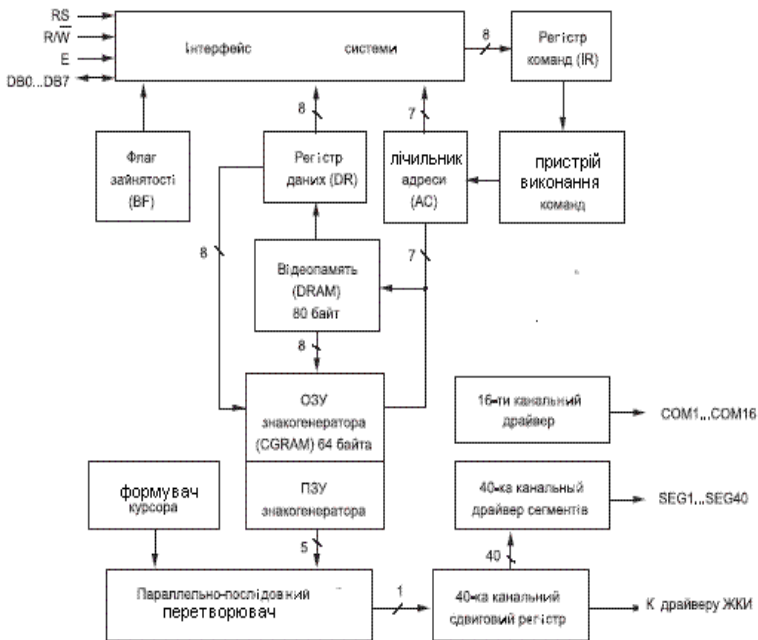


Рисунок 2.9. Запис даних у РКІ

Контролер РКІ після прийому байта команди або байта даних вимагає деякого часу (таблиця 2.2) для обробки одержаної інформації, протягом якого AVR-мікроконтролер не повинен виконувати нових передач. Для цього керуючий мікроконтролер, знаючи скільки часу потрібно РКІ на обробку тієї або іншої команди, виконує часову затримку після кожної передачі інформації.

Якщо під час циклу запису AVR-мікроконтролер передає в контролер індикатора код команди, то цей код записується в регістр команд контролера РКІ і команда зразу починає виконуватися. Якщо AVR-мікроконтролер передає в контролер РКІ дані, які є ASCII-кодами символів, що відображаються, то вони записуються в буфер даних (DDRAM), який звичайно містить 80 комірок (рисунок 2.10). При записі або прочитуванні буфера даних обіг здійснюється до комірки, на яку указує курсор.



**Рисунок 2.10. Блок схема контролера HD4478**

За допомогою сигналу на лінії RS мікропроцесор повідомляє контролер індикатора про те, що саме передається по шині – команда або дані. Сигнал на лінії E є стробом, супроводжуваним сигналами на шині "команди/дані", таблиця 2.2. Запис інформації в РКІ відбувається по спаду цього сигналу. Потенціал на керуючому виводі R/W задає напрям передачі даних: запис в RAM індикатора (R/W=0) або прочитування звідти (R/W=1). Для випадку, коли мікроконтролер має обмежену кількість ліній вводу/виводу, передбачений варіант підключення РКІ з використанням 4-розрядної шини "команди/дані". При цьому кожен байт даних передається по лініях DB4-DB7 послідовно двома тетрадами, починаючи із старшої.

Таблиця 2.2

## Система команд контролера HD4478

Код									Опис команди	Час виконання команди ( $f_{osc} = 250 \text{ кГц}$ )	
S	/	B	B	B	B	B	B	B			
	W	7	6	5	4	3	2	1	0		
										Очистити дисплей і встановити курсор в нульову позицію (адреса 0)	82 мкс до 1.64 мс
										Встановити курсор в нульову позицію (адреса 0). Встановити дисплей щодо буфера DDRAM в початкову позицію. Вміст DDRAM не міняється.	40 мкс до 1.6 мс
								/	D	Встановити напрям зрушення курсора управо (I/D=1) або уліво (I/D=0) при записі/читанні чергового коду в DDRAM. Дозволити (S=1) зрушення дисплея разом із зрушенням курсора.	40 мкс
										Включити (D=1) /виключити (D=0) дисплей. Запалити (C=1) /погасити (C=0) курсор. Зображення курсора зробити миготливим (B=1).	40 мкс

						/ / C L	Перемістити курсор (S/C=0) або зсунути дисплей (S/C=1) управо (R/L=1) або вліво(R/L=0).	40 мкс
						L	Встановити розрядність шини даних 4 біти (DL=0) або 8 біт (DL=1), кількість рядків дисплея - одна (N=0) або дві (N=1), шрифт - 5x7 крапок (F=0) або 5x10 крапок (F=1).	40 мкс
						A <sub>CG</sub>	Установка адреси CGRAM. Після цієї команди дані записуватимуться/ прочитуватимуться в/з CGRAM.	40 мкс
						A <sub>DD</sub>	Установка адреси DDRAM. Після цієї команди дані записуватимуться/ прочитуватимуться в/з DDRAM.	40 мкс
					F	AC	Читання стану busy-прапора (BF) і лічильника адреси. Запис даних в DDRAM або CGRAM.	1 мкс
						Дані	Запис даних в DDRAM або CGRAM.	40 мкс
						Дані	Читання даних з DDRAM або CGRAM	40 мкс

Буфер даних має більше комірок, ніж число знакомісць дисплея.

Зміщуючи вікно індикатора щодо буфера даних можна відображати на дисплеї різні області буфера.

У двустрочних індикаторів перші 40 комірок буфера даних відображаються на верхньому рядку дисплея, а другі 40 комірок – на нижньому рядку.

Зрушення вікна дисплея щодо буфера даних для верхнього і нижнього рядків відбувається синхронно. Курсор видний на індикаторі тільки в тому випадку, якщо він потрапив в зону видимості дисплея (і якщо заздалегідь була подана команда відображати курсор).

Окрім DDRAM контролер ЖКІ містить ще один блок пам'яті – знакогенератор. Його "прошивка", тобто відповідність ASCII-кодів зображенню символів є в описі індикатора.

У схемі підключення РКІ управляючі сигнали E і RS формуються програмно на звичних лініях вводу/виводу AVR. У приведеному прикладі шина даних складається зі 4-х розрядів.

Кожен байт даних при цьому передається за дві послідовні посилки, починаючи із старшої тетради.

Програмування виводу інформації на РКІ проведено наступним чином.

Драйвером якого-небудь апаратного вузла називають набір підпрограм, які враховують всі апаратні особливості схеми включення цього вузла і максимально полегшують роботу з ним головній програмі.

Простою складовою "цеглою" драйвера РКІ є такі підпрограми:

- вивід байта-команди в контролер РКІ;
- вивід байта даних в контролер РКІ;
- підпрограма ініціалізації контролера РКІ.

Перші дві з них для виводу в контролер індикатор байта команди і байта даних цілком залежать від схеми включення індикатора і реалізуються на підставі розглянутих раніше часових діаграм обміну сигналами між контролером індикатора і AVR-мікроконтролером.

Підпрограма ініціалізації контролера РКІ "initlcd\_XXX", посилаючи в індикатор послідовність команд за допомогою підпрограми, задає режим роботи РКІ. Ця підпрограма при програмуванні доповняється залежними від задачі фрагментами.

У підпрограмі ініціалізації виконано вивід постійного (незмінного у весь час роботи програми) тексту на дисплей, а також, перепрограмуючи початкові комірки знакогенератора, можна за допомогою РКІ виводити на дисплей текст, що зберігається у flash-пам'яті програм у вигляді таблиці.

Задаючи початкову адресу таблиці за допомогою директиви .org, ми задаємо адресу 16-розрядної комірки.

Для команди LPM витягання байта даних з пам'яті програм вимагається задати адресу байта, яка у два рази більше адреси слова. Тут же задають початкові значення керуючим бітам (прапорам), за допомогою яких драйвер РКІ обмінюється статусною інформацією з головною програмою.

У даній задачі програмне забезпечення збудоване з використанням системи переривань AVR-мікроконтролера. Тому в цьому випадку підрахунок часових інтервалів покладають на таймер. Процесор при цьому звільняється для вирішення інтелектуальних задач.

## Основні результати і висновки до розділу 2

З'ясовано, що просторово-часова залежність локаційних сигналів визначає відповідну структуру складових як корисного, так і завадового сигналів.

Розроблена методика оцінки параметрів та інформативності відбитого випромінювання

Отримано аналітичне визначення часової залежності локаційних сигналів, що вимірюються фазовим методом. Одержане співвідношення, що пов'язує роздільну здатність ОЕП за швидкістю, часові характеристики та точність вимірювань.

Описано кореляційні властивості оптичного сигналу відбиття в залежності від структури поверхні об'єкта.

Аналітично доведено перевагу кореляційних методів обробки зашумлених оптико-локаційних сигналів, які володіють максимальною перешкодостійкістю та не залежать від спотворень форми досліджуваних сигналів.

З'ясовано, що реєстраційні сигнали на приймальній апертурі у випадку дифузної та дзеркальної поверхні об'єкта мають різний характер з причини гауссівської та негауссівської статистики поля сигналу відповідно.

Визначена оптимальна структура приймача з урахуванням того, що статистична обробка оптичних сигналів має ряд специфічних особливостей, пов'язаних з квантовою структурою оптичного поля, відмінною для слабого та сильного сигналів.

Розроблена методика вимірювання параметрів відбитого оптичного випромінювання в оптико-локаційних системах в наносекундному часовому діапазоні, яка покращує оперативну обробку сигналу.

## Список використаних джерел до розділу 2

1. Пат. Японии 5-677 G 01 S 17/36, 17/42. Устройство для измерения расстояния с помощью лазера.
2. Nakamura Koichiro та інші. Измерение расстояний путем определения оптических частот при использовании лазера с обратной связью и частотным сдвигом // IEEE J.Quantum Electron. – 2000. – Т. 36. № 3. – С. 300–316.
3. Gurdev Lyuan L. та інші. Метод измерения скоростей с высоким разрешением при обработке когерентных сигналов в импульсных лазерных локационных системах // J. Opt. Soc. Amer. A. – 2001. – Т. 18, № 1. – С. 134–142.
4. Myneni Krichna та інші. Прецизионное определение расстояний при использовании хаотичной последовательности лазерных импульсов // J. Appl. Phys. Lett. – 2001. – Т. 78, № 11. – С. 1496–1498.
5. Красильник З. Ф. Кремниевые наноструктуры для оптоэлектроники // Тез. допов. 1-ої Укр. наук. конф. з фізики напівпровідників (УНКФП-1) (з міжнародною участю). Одеса. – 2002. – Т. 1 – С. 42.
6. Самюэль Уэбер. Перспективы новых поколений ИС–приборов на квантовых эффектах // Электроника. – 1988. – № 20. – С. 83–89.
7. Takeuchi T. та інші. Быстродействующие фотодиоды с высокими мощностью и эффективностью, имеющие волноводную структуру с градиентом показателя преломления со слабой оптической связью // Electron. Lett. – 2000. – Т. 36, № 11. – С. 972–973.
8. Windisch R. та інші. Микролинзовые светодиоды с гигабайтным быстродействием и высокой эффективностью // Electron. Lett. 2000. – Т. 36, № 4. – С. 351–352.
9. Ясима Хироеси, Кобаяси Наото. Состояние исследований и дальнейшие пути развития в области оптической техники //Electrolab. – 2000. – Т. 64, № 7.



10. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Фотоприемники и фотоприемные модули нового поколения // Прикладная физика. – 2001. – № 6. – С. 20–38.
11. Айнбунд М. Р. Быстродействующий фотоприемник для однофотонного счета // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 5. – С. 148–149.
12. Ito H. та інші. Фотодиод на гетероструктуре In/InGaAs с однонаправленным переносом носителей на ширину полосы пропускания 3 дБ на частоте 310 ГГц // Electron. Lett. – 2000. – Т. 36, № 21. – С. 1809–1810.
13. Пат. США 5652651 G 01 C 3/08. Лазерный дальномер с регулируемой чувствительностью и точностью измерений.
14. Пат. Японии 4-39038 G 01 S 17/10. Устройство для измерения интервала времени между световыми импульсами.
15. Пат. США 5359404 G 01 C 3/08, G 01 P 3/36. Лазерный измеритель скорости.
16. Пат. США 5202742 G 01 C 3/08, 1/00. Лазерный локаатор для системы наведения автомобиля.
17. Пат. Японии 60-64310 G 01 S 17/32. Способ измерения расстояния лазерным лучом.
18. А.с. СССР 1425446 G 01 C 3/08. Светодальномер.
19. А.с. СССР 1485012 G 01 C 3/08. Фазовый светодальномер.
20. А.с. СССР 1508093 G 01 C 3/00. Светодальномер.
21. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Инфракрасные лазерные локационные системы. М.: Воениздат, 1987.
22. Костецкая Я. М. Свето- и радиодальномеры. Львов.: Вища школа, 1986.
23. Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Система контроля параметров отстыковки малоразмерных спутников от космической платформы // Матеріали V-ої Міжнар. н.-практ. конф.

“Сучасні технології в аерокосмічному комплексі”. Житомир. 2001. – С. 71–76.

24. Ваксман Ю. Ф., Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Оптико-электронный дальномер малых дистанций для динамических систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2003. – № 2. – С. 44–49.

25. Ваксман Ю. Ф., Сантоній В. І., Будіяньська Л. М., Иванченко І. О. Властивості відкритої ІЧ-оптопари лазерний діод–ріп–фотодіод у фазометричних системах ближнього дальнометрування динамічного призначення // Фотоелектроніка. – 2003. – № 12. – С. 102–106.

26. В. И. Сантоний, В. В. Янко, И. А. Иванченко, Л. М. Будиянская. Фазовый оптико-электронный дальномер малых дистанций // Сб. научных трудов по материалам 5-го Междунар. Молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». Харьков, 2001. – Ч. 2. – С. 304–305.

27. Мусьяков М. П., Миценко И. Д. Оптико-электронные системы ближней дальнометрии. М.: Радио и связь, 1991.

28. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). М.: СК Пресс, 1996.

29. Янко В. В., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Применение языка PSpice для моделирования оптико-электронных систем // Труды Четвертой междунар. н.-практ. конф. “Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ)”. Одеса, 2003. – С. 1218.

30. Баклицкий В. К., Юрьев А. Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. М.: Радио и связь, 1982.

31. Пестряков В. Б., Кузенков В. Д. Радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1985.

32. Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В. Источники и приемники излучения. СПб.: Политехника, 1991.

33. Якушенко Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Сов. Радио, 1980.
34. Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Иванченко И. А. Метод самосканирования для измерения диаграммы направленности оптико-электронных устройств // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – Вып. 2 (11). – С. 168–172.
35. Черешанский В. А., Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Сантоний В. И., Вернигора С. А. Оптико-электронный дальномер для робототехники // Тез. докл. VIII Всесоюзн. н.-т. конф. «Измерительные информационные системы». Ташкент, 1987. – Ч. III. – С. 10.
36. Устинов Н. Д., Матвеев И. Н., Протопопов В. В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. М.: Наука, 1983.
37. Протопопов В. В., Устинов Н. Д. Лазерное гетеродинамирование. М.: Наука, 1985.
38. Belyaev A E., Venger E. F. Effect of microwave and laser radiations on the parameters of semiconductor structures. Київ, Intac, 2002.
39. Иванченко І. О., Сантоній В. І., Будіяньська Л. М. Метод вимірювання коефіцієнта відбиття поверхні в оптико-локаційних пристроях // Тези доп. Всеукр. з'їзду “Фізика в Україні”. – Одеса, 2005. – С. 152.
40. Иванченко И. А., Сантоний В. И., Будиянская Л. М. Оптико-электронный дистанционный сенсор с растровой решеткой // Тези доп. Міжнар. н.-т. конф. “Сенсорна електроніка і мікросистемні технології”. – Одеса, 2004. – С. 139.
41. Иванченко И. А., Сантоний В. И., Будиянская Л. М. Дистанционный оптико-электронный датчик с растровой решеткой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 4.
42. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л. Приемники оптического излучения. М.: Радио и связь, 1987.

43. Лазерные измерительные системы. Под ред. Д. П. Лукьянова. М.: Радио и связь, 1981.
44. Лобачев М. В. Радиоэлектронная геодезия. М.: Недра, 1980.
45. Пат. Франции G 01 S 17/08. Портативный прибор с лазерным диодом для проведения точных измерений при выполнении строительных работ.
46. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986.
47. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейств Tiny и Mega фирмы «ATMEL». Москва: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004.
48. Янко В. В., Ваксман Ю. Ф., Молчанюк В. И. Проектирование и моделирование оптико-электронных сенсоров с применением языка Pspice // Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. “Сенсорна електроніка і мікросистемні технології” (СЕМСТ-1). – Одеса, 2004. – С. 101.

### **3. ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ВОДИ У ВІДКРИТИХ ВОДОЙМАХ**

Визначення режиму коливань рівнів води у відкритих водоймах має велике практичне значення, оскільки дозволяє проводити, зокрема, гідрологічні прогнози зміни природної обстановки.

В останні десятиліття збільшилося число катастрофічних повеней, для попередження яких необхідний постійний комплексний моніторинг рівня води відкритих водойм, що дозволяє одержати картину просторової та часової зміни стану водного об'єкта в цілому. Знання режиму рівнів необхідно для судноплавства, побудови гідротехнічних споруд та проведення меліоративних заходів.

Тенденції збільшення числа екстремальних станів відкритих водоймищ поставили в розряд актуальних проблему створення сучасних систем вимірювання в умовах високої динаміки рівня води об'єкта, яка характерна для періоду сезонного паводку або нештатної зміни гідрологічної ситуації, з інших причин.

Знання рівня води дозволяє визначити об'єм водотоку та прогнозувати можливість виникнення затоплень місцевості.

Зміна режиму водного об'єкту в період стихії часто характеризується високою динамікою, в умовах якої традиційне гідрометричне устаткування на водомірних постах будь-яких територій не може забезпечити оперативне збирання і обробку інформації та прийняття відповідних упереджувачих заходів.

Для попередження наслідків катастрофічних повеней та паводків необхідний постійний моніторинг рівня води в режимі on-line.

Розробка та створення автоматизованої системи контролю рівня води у відкритих водоймах на основі лазерних телекерованих датчиків рівня забезпечує оперативний зв'язок між гідрометричними постами і центром збирання та обробки інформації сучасними засобами зв'язку для узагальнень гідрологічного стану водних об'єктів, екологічної безпеки та попереднього протипаводкового оповіщення населення.

### **3.1. Задачі гідрометрії та гідрологічна модель водного об'єкта**

Одним з найважливіших параметрів, найбільш повно відображаючих стан водного режиму рік, озер, водосховищ та інших водних об'єктів, є рівень води. Вимірювання його ведуться більш ніж на 6000 пунктах спостережень державної гідрологічної мережі [1]. Від достовірності вимірювання рівня води залежить достовірність вимірювання щоденних витрат і, у кінцевому рахунку, достовірність урахування всього стоку. Однак такий важливий для різних галузей народного господарства вид вимірювань, як вимірювання рівня води, все ще не має сучасного метрологічного забезпечення.

Серед сучасних екологічних проблем особливе місце займають питання управління, використання та охорони водних ресурсів, особливо ресурсів прісних вод суші [2]. Це пов'язано з тим, що саме прісні води являють собою один з найбільш уразливих компонентів біосфери.

Погіршення якості вод та скорочення водних ресурсів знижує якість навколишнього середовища, ефективність виробництва, створює проблему збереження біологічного різноманіття та викликає різні негативні соціальні наслідки. Тому значна увага приділяється сучасному стану мережі системи моніторингу водних

ресурсів та проблемам забезпечення “водною” інформацією.

Задачі, які повинні вирішувати еколого-гідрологічні дослідження, складаються у вивченні гідродинамічних та гідрофізичних умов функціонування гідроекосистем. Особливо актуальні еколого-гідрологічні дослідження при екологічному прогнозуванні.

В останнє десятиріччя у багатьох регіонах відзначається збільшення числа катастрофічних повеней. Повені є одними з найбільш часто повторюваних стихійних лих. По площі охоплених територій та нанесеній шкоді вони часто перевершують всі інші надзвичайні ситуації.

Існуючі кліматичні тенденції збільшення середньорічних сум опадів в результаті екстремальних зливових явищ дозволяють передбачати, що для попередження катастрофічних паводків та зниження негативних наслідків від шкідливої дії вод необхідний постійний комплексний моніторинг водного режиму рік гірського типу.

В Україні державне управління в області використання і охорони вод та відновлення водних ресурсів здійснюється на основі державних, міждержавних та регіональних програм [2]. Ці програми розробляються з метою здійснення цілеспрямованої і ефективної діяльності по задоволенню потреб населення і галузей економіки у воді, збереження, раціонального використання і охорони вод, попередження негативної дії на них.

Стосовно перспектив розвитку технічних засобів одержання гідрологічної інформації відзначається, що вимоги до неї змінюються та ускладнюються [3]. До останнього часу результати спостережень використовувались для одержання інформації про режим водних об'єктів та його прогнозування, а тепер постає

задача на основі цих спостережень ефективно керувати як окремими водними об'єктами, так і цілими водогосподарськими системами. Крім того, через зростання водоспоживання та загострення дефіциту водних ресурсів зростають вимоги до повноти, точності і оперативності контролю кількості та якості природних вод.

Взагалі, кожному водоймищу та кожному гідрологічному посту відповідають свої оптимальні значення точності і частоти вимірювань, причому ці значення змінюються у часі. Між тим автоматичний рівнемір повинен бути серійним, з конкретними характеристиками. У зв'язку з великими вимогами він не зможе забезпечити оптимальну точність і частоту вимірювань рівня у кожному випадку. Тому необхідно вибрати технічні характеристики рівнеміра, щоб оптимальність спостерігалась для найбільш типових ситуацій.

Згідно залежності оптимального кроку дискретизації рівня на постах гідрологічної мережі Держгідромету від площі водозбору виходить, що якщо прийняти крок дискретизації 10...15 хвилин, то задана точність обчислення максимальних витрат води забезпечується приблизно на 99 % всіх постів, а середніх добових витрат – практично на всіх постах гідрологічної мережі.

Разом з тим для більшості постів така частота спостережень є надмірною. Тому у рівнемірі доцільно передбачити декілька значень кроку дискретизації, які забезпечать задану точність розрахунку середніх добових і експериментальних витрат води у паводок і повинь при мінімальному надлишку інформації про рівень.

В результаті досліджень сформовані наступні вимоги до рівнемірів:



1. Оптимізація технічних характеристик будь-якого масового мережного приладу, зокрема рівнеміра, являє собою багатокритеріальну задачу з нечітко визначеними цільовими функціями і граничними умовами. Розв'язання цієї задачі доцільно шукати для усереднених типових ситуацій з урахуванням їх важливості і повторності.

2. Вимоги до точності рівнеміра залежать від того, чи проводиться у ході експлуатації перемикання діапазонів вимірювання. Якщо для всієї амплітуди коливань рівня води застосовується один діапазон вимірювання, то оптимальне значення границі припустимої похибки рівнеміра складає у середньому 0,4...0,5 % діапазону, а якщо застосовується 2-3 діапазони, то 1...1,5 %.

3. Оптимальна частота дискретизації рівня змінюється у широких межах в залежності від особливостей і фази водного режиму. Тому у рівнемірі доцільно передбачити 3–6 значень інтервалу дискретизації у діапазоні від 10 хвилин до 12 годин і забезпечити можливість перемикання інтервалу дискретизації у ході експлуатації.

4. Рівнемір разом з гідрометричною спорудою, де його встановлено, повинен володіти властивостями фільтра нижніх частот для зменшення впливу високочастотної завади, обумовленої вітровим хвилюванням, турбулентними пульсаціями, проходженням суден тощо.

5. Застосування рівнеміра з вказаними оптимальними технічними характеристиками на гідрологічній мережі дозволяє у більшості випадків визначати середні добові і екстремальні рівні та витрати води автоматизованими методами.

6. У зв'язку з наявністю випадкових завод у вигляді короткочасних динамічних збурень водної поверхні, а також внаслідок крайньої неоднорідності ходу рівня у часі доцільно для підвищення надійності запису рівня

використати, поряд з цифровим, ще й аналоговий регістратор.

Для повномасштабного вивчення динаміки параметрів придатна модель водного об'єкта як складової частини екологічного середовища (рисунк 3.1.), що характеризується широким спектром сезонних, часових та випадкових змін.

Модель водного об'єкта призначена для вирішення задач еколого-гідрологічних досліджень та урахує його гідродинамічні та гідрофізичні параметри. Оптимальною є модель, яка утримує найбільш вагомі характеристики об'єкта, що забезпечує максимальну близькість до об'єкта. Модель динаміки параметрів водного об'єкта складена для визначення робочих меж вимірювального обладнання.

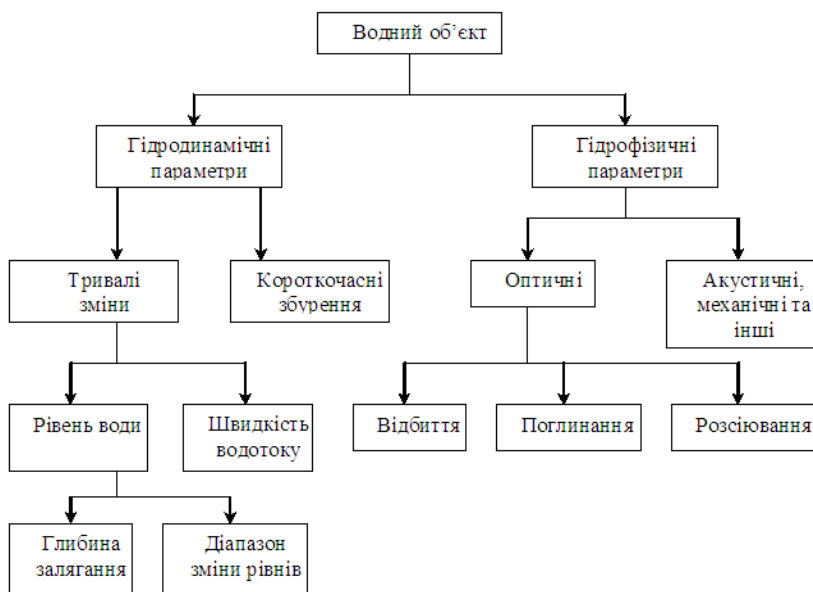


Рисунок 3.1. Гідрологічна модель водного об'єкта

Базою розробленої гідрологічної моделі обрано рівень води, який є одним з важливіших параметрів, найбільш повно визначаючих особливості водного режиму водних об'єктів.

Водний режим гідрологічних об'єктів характеризується певними фазами та особливостями. Для відкритих водойм найбільш характерні сезонні фази від повені навесні до межені влітку, які супроводжуються максимальною зміною рівнів.

Таким чином, глибина залягання та діапазон зміни рівнів є основними факторами, що характеризують водний режим водного об'єкта. Відомості [4] по більшості опорних постів визначають інтервал залягання глибин у межах 0–20 м, а річні діапазони змін рівнів знаходяться у межах 0–3 м.

Зміни параметрів оточуючого середовища – температури і вологості повітря, рівня і температури води, які мають добову чутливість та сезонну мінливість, обумовлюють протяжні у часі відхилення об'ємних та поверхневих властивостей водного об'єкта.

Гідрофізичні параметри водного об'єкта групуються за тими фізичними властивостями речовин, що утворюють поверхню розділу, різницю яких покладено в основу методу дослідження.

З груп визначаючих властивостей середовищ, що використовуються в рівнемірах різного принципу дії (акустичні, теплові, електромагнітні, оптичні, механічні), основним вимогам коректного моніторингу водойм задовольняють дистанційні методи вимірювання рівня. Із числа дистанційних методів стеження за водними об'єктами перспективами та перевагами володіє оптичний спосіб, що перевищує інші методи за показниками точності та швидкодії.

Механізм взаємодії оптичного випромінювання з водною поверхнею визначає гідрофізичну складову моделі водного об'єкта. З'ясування цього механізму передбачає урахування оптичних властивостей досліджуваного об'єкта. Оптичні властивості природних вод (показники послаблення, поглинення та розсіювання випромінювання) являють собою суперпозицію оптичних характеристик окремих компонентів.

Частина випромінювання відбивається водною поверхнею назад в атмосферу, остання проникає у глибину водойму та поглинається.

Сонячна радіація поглинається водою частково у діапазоні довжин хвиль від 350 до 700 нм.

Загальна відбивна здатність (альbedo) водної поверхні складається із внутрішньо водного, обумовленого розсіюванням випромінювання водою вверх, і поверхневого, обумовленого відбиттям випромінювання поверхнею води.

Відбивна здатність водної поверхні для сонячного випромінювання залежить від багатьох факторів, але найбільш сильно альbedo залежить від висоти сонця. З цієї причини продовж дня альbedo змінюється від 2–8 % (у полудневі години) до 25–30 % (у ранковий та вечірній час) [5].

Максимум послаблення чистої води досягається на довжині хвилі 750 нм. Максимуми поглинання розташовані на довжинах хвилі 860 та 745 нм. У спектрі пропускання чистої води є своєрідне “вікно прозорості” в області довжин хвиль 300–650 нм. Ця обставина є основою для пошуку шляхів використання видимого діапазону спектра з метою дистанційного моніторингу водних об'єктів.

### **3.2. Система моніторингу та засоби контролю рівня води**

У теперішній час гідрологи ведуть спостереження практично за всіма пераметрами водного балансу і за різними процесами, що протікають як у водному середовищі, так і на самій території водозборів [6]. Для здійснення цих робіт створено і застосовується велика кількість різних гідрометричних споруд, що не просто дають можливість виконати необхідні виміри, але і дозволяють багато які з них автоматизувати та полегшити працю операторів.

Гідрометричні роботи по вимірюванню витрат води річкових потоків трудомісткі і потребують великих витрат часу. Так, на вимірювання витрати води великої ріки витрачається 6-8 годин і більше. Щоб зменшити обсяг гідрометричних робіт, без зниження точності визначення стоку води, на основі виміряних характеристик потоку визначають зв'язки між витратами та рівнями води. Якщо такий зв'язок стійкий, то вимірювання витрати води можливо замінити вимірюванням рівня, що набагато швидше і простіше [7].

Вимірювання рівня, при одночасному вимірюванні глибини і ширини потоку та схилу поверхні води, визначає геометричні параметри потоку. Вимірювання рівня ведуться більш ніж на 6000 пунктах спостережень державної гідрологічної мережі [4].

Автоматичне вимірювання рівня води у польових умовах здійснюють за допомогою споруд, що звуться установками самописів рівня води (УСРВ). УСРВ – це гідрометрична споруда, котра у комплексі з технічним оснащенням забезпечує автоматичну реєстрацію положення рівня води у відкритому водотоку або водоймі. Основними факторами умов проведення вимірювань рівня

при вивченні водного режиму є наступні: віддаленість від центра обслуговування, глибина залягання та діапазон зміни рівнів, періодичність вимірів, точність або похибка вимірювань.

При переході до автоматизованих спостережень встановлюється оптимальна точність вимірювання рівня води відкритих водойм, так як вартість і склад вимірювальної апаратури визначається заданою похибкою реєстрації параметра.

Одним із критеріїв оптимізації процесів спостереження стосовно до основної задачі гідрометрії, обчисленню стоку по кривій витрат (КВ), є усунення впливу похибки середнього добового рівня на точність визначення витрат води.

За принципом вимірювань, доцільних для гідрогеологічних розрахунків, рівнеміри діляться на дві групи: рівнеміри, що вимірюють власне рівень води, і рівнеміри, що вимірюють зниження або підвищення рівня по відношенню до деякого початкового положення [8].

Рівнеміри першої групи мають, як правило, великий діапазон вимірювань і до них належать тросові і стрічкові переносні рівнеміри, що призначені для одиничних вимірювань рівня.

Переносні прилади складають не менш 90 % від загального числа рівнемірів. До рівнемірів другої групи належить переважна більшість типів рівнемірів. Серед стаціонарних рівнемірів найбільше застосування знайшли прилади з поплавцем постійного занурення.

У межах групи оптичних рівнемірів розрізняють дві підгрупи – візуальні та фотоелектричні. Згідно з метою пошуку інтерес являють фотоелектричні рівнеміри, вид вихідного параметру (струм, напруга) яких дозволяє здійснювати дистанційний вимір рівня. Серед них окрему групу складають оптико-волоконні датчики, що

забезпечують точне вимірювання рівня по перевищенню або зниженню відносно заданого значення [9].

В результаті аналізу характеристик рівнемірів, що застосовуються на існуючих в Україні гідрометричних постах, виявлені основні вимоги до їх технічних та експлуатаційних параметрів, а також проаналізовані наявні недоліки. Суттєва частина постів оснащена напівавтоматичними рівнемірами-самописами, які проводять вимірювання рівня води два рази на добу та запис одержаних значень на паперовий носій.

На окремих постах значення рівня води, що виміряні та перетворені в електричний сигнал, за допомогою провідних систем зв'язку поступають безпосередньо до оператора.

Основний діапазон вимірювання рівня води для перелічених вище та інших рівнемірів складає від 0 до 10 м, похибка вимірювання  $\pm 1$  см, термін бездоглядної роботи від 1 до 100 діб, вживана потужність від лінійного або автономного джерела живлення 3...100 Вт.

Головним недоліком даних рівнемірів є великий термін запізнення в одержанні інформації центрами збору і обробки даних про стан водних об'єктів та вартість доставки інформації і технічного обслуговування. Їх технічні можливості не дозволяють оперативно змінювати режим (частоту) вимірювання рівня води в залежності від зміни режиму водного об'єкта.

Для створення автоматизованої мережі гідрометричних спостережень за рівнем води на багаточисельних ділянках водозбору великих водних об'єктів необхідно мати:

- точний, економічний та автономний рівнемір, що працює в польових умовах;
- оперативний та надійний зв'язок між окремими гідрометричними постами контрольованого водного

об'єкта і центром збору та обробки інформації;

- систему аналізу інформації, що надходить, для багатокритеріального відображення динаміки водного об'єкта, виробки оптимальних оперативних рішень.

В теперішній час вимірювання рівня води більшістю існуючих рівнемірів проводиться за допомогою механічних дій:

- система поплавець–противага,

- опущення різного виду електродів до моменту контакту з поверхнею води і протікання струму через обсадну трубу свердловини.

В сучасних умовах точність і надійність роботи таких пристроїв недостатня внаслідок роботи механіки в умовах агресивного середовища та великого діапазону температур.

Максимально незалежними від впливу параметрів середовища і кліматичних дій є рівнеміри, що засновані на неконтактному оптичному методі вимірювання відстані [10,11]. Оптичні рівнеміри розрізняються на дві підгрупи за принципом вимірювання рівня – візуальні та фотоелектричні.

В залежності від явища, покладеного в основу метода вимірювання, фотоелектричні рівнеміри розділяються на рівнеміри відбиття, заломлення та поглинання. Фотоелектричні рівнеміри володіють безперечною перевагою з позицій метрології, оскільки у них значення вихідного параметру (струм, напруга, опір) пропорційно рівню, тобто вихідна характеристика є лінійною.

Незалежно від механізму взаємодії випромінювання з поверхнею структура фотоелектричного рівнеміра складається з джерела світла, світловодного каналу, світлочутливого приймача та реєстраційного приладу.



Функціональний опис вимірювання рівня води дистанційним оптичним методом, заснованим на вимірюванні фазових співвідношень між випроміненим та відбитим оптичними сигналами, являє собою основну формулу оптичної локації [12]:

$$l = [\Delta\varphi / (2\pi)] \cdot [c / (2f)], \quad (3.1.)$$

де  $l$  – вимірювана дистанція,  
 $\Delta\varphi$  – зсув фази,  
 $c$  – швидкість світла у повітрі,  
 $f$  – частота сигналу.

Значна частина похибок вимірювання рівня води пов'язана зі зміною параметрів оточуючого середовища і має добову чутливість та сезонну мінливість. Природно, що внутрішньо добова кореляція цих похибок дуже значна. У той же час друга складова похибки, яка обумовлена, наприклад, динамічними збуреннями водної поверхні має період не більш десятків секунд і при дискретних вимірюваннях рівня може рахуватися як некорельована.

Виходячи з цього похибку вимірювання рівня представляють у вигляді

$$S_{H_i}^2 = \eta_H^2 + \xi_H^2,$$

де  $\eta_H$  – похибка, постійна у перебігу доби;  $\xi_H$  – випадкова похибка (білий шум).

Таким чином, для зменшення впливу високочастотної завади, обумовленої короткочасними динамічними збуреннями водної поверхні, рівнемір повинен володіти властивостями фільтра нижніх частот.

Не дивлячись на значний прогрес у розвитку фотоелектричних рівнемірів, вони не знайшли суттєвого

застосування у якості широкодіапазонних рівнемірів. В той же час широко використовується висока чутливість фотоелектричних рівнемірів до зміни рівня – вони застосовуються в якості точних сигналізаторів рівня.

Використання у складі рівнеміра лазерного вимірника відстані дозволяє одержати точність вимірювання порядку 1 мм до поверхні поплавця на поверхні води у свердловині, у діапазоні вимірювань 0...20 м. За рахунок зниження вживаної потужності від автономного джерела живлення до 0,4...0,5 Вт (у момент вимірювання відстані) збільшено час бездоглядної роботи до 6...7 місяців.

Для режиму вимірювань рівня води (кількість вимірів за добу), збереження одержаного масиву даних та інших випадкових функцій рівнемір оснащений мікроконтролером з енергонезалежною пам'яттю та низьким енергоспоживанням. Підвищення оперативності та зниження вартості доставки результатів поточних вимірювань рівня води або масиву даних передбачає обладнання лазерних рівнемірів засобами радіозв'язку з єдиним центром збору і обробки даних.

Найбільшою надійністю, мінімальною вартістю комплексу обладнання, наявністю вже існуючої розгалуженою мережі радіоретрансляторів на території України мають мережі GSM-зв'язку.

Радіозв'язок стандарту GSM широко застосовується в системах віддаленого контролю, управління і сигналізації [13]. До таких систем, як космічні та військово-промислові комплекси, приєдналися системи газорозподільних організацій та комунального господарства. Наприклад, для дистанційного опитування показань електролічильників застосовується комплекс телеметричного контролю віддалених об'єктів в мережах GSM GPRS [14].

Оснащення працюючого у польових умовах рівнеміра GSM-модемом, дозволяє здійснити передачу даних про рівень води або іншу службову інформацію у центр збору і обробки даних про водний об'єкт, що має у GSM-мережі свій номер.

Підсистема зв'язку в структурі системи збору і обробки даних володіє невисокою вартістю обладнання і підтримки мережі. Допускається швидкість процесу передачі метрологічної інформації по запиту із центру збору до 10 хвилин на елементарну операцію обміну. Показники надійності доставки одиничного інформаційного повідомлення достатньо високі (не нижче 98 % імовірності успішної доставки). Необхідна наявність засобів підтвердження доставки порції метрологічної інформації, а також відкладеної доставки у випадку тимчасової відсутності зв'язку.

Всім цим вимогам задовольняє рішення про базування зв'язкової мережі системи на існуючих мережах GSM. При цьому порції метрологічної інформації передаються за допомогою простого повідомлення з підтвердженням. Надійність зв'язку у цьому випадку заявляється і гарантується оператором мобільного зв'язку.

Формат GSM-повідомлення утримує набір полів, котрі заповнюються символічною інформацією. Завдяки цьому процедура обміну метрологічною інформацією з постом відбувається у наочному виді. Можливий режим “ручного” керування вимірювачем за допомогою звичайного мобільного телефону. Вбудований GSM-модем вимірювача приймає повідомлення і представляє його у розпорядження вбудованого мікроконтролера. У зворотному напрямку мікроконтролер за результатами вимірювання формує відповідний символічний “тестовий” файл і через GSM-модем відправляє його в центр збору. Така організація телеметричної мережі виявляється

гнучкою і ефективною з точки зору економічних показників, представляє множину сервісних можливостей.

В результаті проведення теоретичних досліджень:

- розроблена еколого-гідрологічна модель водного об'єкта,
- визначені експлуатаційні характеристики вимірювального обладнання,
- з'ясовані переваги та особливості застосування дистанційного оптичного методу вимірювання рівня водної поверхні,
- запропоновані структура автоматичного телекерованого рівнеміра та фізичний принцип точного вимірювання дистанції,
- обґрунтоване застосування GSM-мереж для зв'язку між центром збору інформації та рівнеміром,
- запропонований спосіб взаємозв'язку за допомогою GSM-повідомлень.

Автоматизована система контролю рівня води у відкритих водоймах складається із автономних телекерованих датчиків рівня, що функціонують згідно методики збирання і обробки даних, отриманих на гідрометричних постах відкритих водойм, та GSM-телеметричного пристрою „Рівень” для синтезу з комп'ютерним центром контролю і управління [15–19].

Пристрій „Рівень” керує режимом роботи рівнеміра, здійснює запис та пересилання вимірюваної інформації по каналах стільникового зв'язку в центр збирання та обробки даних. Для взаємообміну даними та службовою інформацією використана SMS-технологія, як найбільш надійна та наочна. Формат керуючих SMS-повідомлень є паролем, що виключає потрапляння випадкових повідомлень, здатних викликати помилкові дії системи.

Програмне забезпечення системи гідромоніторингу спрямовується на обробку отриманої інформації з метою узагальнень по гідрологічному стану водних об'єктів,

з'ясуванню його відповідності вимогам екологічної безпеки та, у випадку необхідності, завчасного протипаводкового оповіщення населення.

### **3.3. Лазерний рівнемір та інтерфейс зв'язку керуючим комп'ютером системи моніторингу**

Оптичний рівнемір, призначений для вимірювання рівня води у мірних свердловинах гідрологічних постів спостереження за відкритими водними об'єктами, застосовується при наступних параметрах.

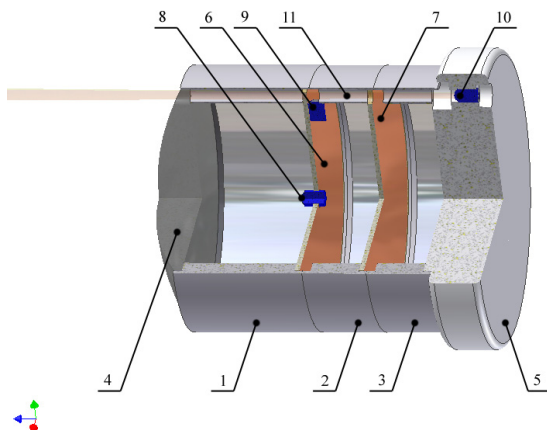
- Типовий діаметр обсадної труби свердловини знаходиться у діапазоні 100...200 мм.
- Глибина до дзеркала води – не більш 10 м.
- Сезонні коливання рівня води – від 3-х до 7-ми метрів.
- Сезонні коливання температури у стовбурі свердловини складають 5°C (10...15°C).
- Відносна вологість повітря – 75...90 %.

Розробка лазерного рівнеміра проведена з урахуванням перелічених умов функціонування, а також вимог мінімізації енергоспоживання від автономного джерела електроживлення, у програмному середовищі Pspice [20-22] системи тримірного машинобудівного конструювання Autodesk Inventor компанії Autodesk, яке дозволяє:

- створювати базові двомірні ескізи деталей виробу;
- перетворювати двомірні ескізи у просторові моделі;
- автоматично генерувати на основі просторових моделей робочі креслення деталей виробу у відповідності з нормами державних стандартів;
- у тримірному просторі збирати деталі виробу у вузли та проводити повне збирання виробу;

- складати схеми збирання-розбирання вузлів та виробу в цілому, здійснюючи повний контроль параметрів сполучення всіх елементів.

Зовнішній вигляд рівнеміра наведений на рисунку 3.2 у виді тримірної проекції так званої твердотільної моделі.



**Рисунок 3.2. Тримірна проекція твердотільної моделі рівнеміра**

Розріз у  $\frac{3}{4}$  дозволяє наочно показати взаємне розташування основних деталей та вузлів рівнеміра. Корпус рівнеміра складається із кільцеподібних деталей 1, 2, 3, виконаних із дюралюмінію і з'єднаних один з одним за допомогою гвинтів M2,5. Гвинти проходять у співвісних отворах деталей 1, 2, 3 корпусу вздовж циліндричних твірних і розташовані діаметрально.

У передній частині корпусу по всьому діаметру у пазі деталі 1 встановлюється лінза об'єктива фотоприймача 4. З метою забезпечення герметичності пристрою лінза кріпиться за допомогою епоксидного компаунда. Задня частина корпусу закрита кришкою 5, котра прикручується до деталі 3 за допомогою трьох

гвинтів М2,5. Друковані плати 6 і 7 встановлюються у пази корпусних деталей 1, 2, 3 і надійно фіксуються в корпусі при стисканні корпусних деталей кріпильними гвинтами.

Приймально-передавальна оптична система рівнеміра розроблена з урахуванням геометричних розмірів свердловин, а також елекромагнітної сумісності приймальних та передавальних вузлів принципової схеми.

Зондує оптичне випромінювання рівнеміра, спрямоване вздовж стовбура свердловини у бік катафотної поверхні поплавця, розташованого на поверхні води, максимально фокусується, щоб не підсвічувати стінки свердловини, створюючи тим самим один або декілька помилкових рівнів води. Такими можливостями володіє лише сфокусоване випромінювання лазерного діода, що обумовило вибір останнього у якості випромінювача.

Вузький циліндричний отвір 11, сформований у деталях корпусу співвісно з об'єктивом випромінювача (ВП) 10 та оснащений тонкостінною пластиковою трубкою чорного кольору, що виступає у вигляді бленди за поверхню лінзи об'єктива ФП, забезпечує внутрішнє оптичне розв'язання між ВП і ФП. Для одержання максимальної фоточутливості рівнеміра лінза об'єктива ФП займає площу передньої частини корпусу. ФП розташовується на геометричній вісі об'єктива і відповідно всього корпусу у фокусі лінзи, що автоматично забезпечує спрямованість його поля зору вздовж вісі свердловини.

Наявність у корпусі одного пристрою потужного джерела накачки оптичного випромінювача і високочутливого резонансного вхідного каскаду фотоприймача припускає застосування оригінальних конструктивних прийомів елекромагнітного екранування. Випромінювач 10 і ФП 8 розташовуються в окремих ізольованих відсіках корпусу на максимально можливій відстані один від одного. Елементи вхідних каскадів

каналу фотоприйому встановлюються усередині комірок електромагнітних екранів, розташованих на друкованій платі 6 у безпосередній близькості від ФП 8.

Лазерний діод 10 з об'єктивом, що фокусує розташовується у тілі кришки 5, а генератор накачки встановлюється на її внутрішній поверхні під електромагнітним екраном. ФП 9 опорного каналу встановлюється на друкованій платі 6 насупроти вікна у світловому каналі випромінювача. Непрозорий металічний корпус ФП 9 повністю виключає проникнення випромінювання, що зондує із світлового каналу випромінювача у порожнину відсіку фотоприймача вимірювального каналу.

На рисунку 3.3 представлена принципова схема рівнеміра, яка складається із трьох функціональних білків каналів опорного та вимірювального сигналів.

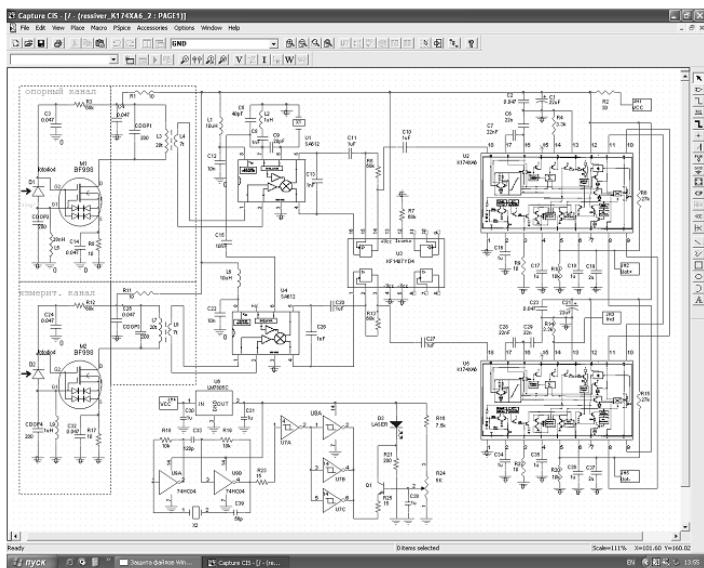


Рисунок 3.3. Принципова схема рівнеміра



У склад блока накачки випромінювача входять задавальний генератор, реалізований на двох елементах мікросхеми U9, підсилювач потужності (чотири елементи мікросхеми U7), ключовий каскад (транзистор Q1 і лазерний діод D3). Живлення у блок накачки випромінювача надходить через лінійний стабілізатор U6. Частота задавального генератора стабілізована за допомогою кварцового резонатора X2.

Канал опорного сигналу складається із фотодіода D1, резонансного підсилювача (елементи M1, C<sub>dop.2</sub>, C<sub>dop.1</sub>, L3, L4), перемножувача з вбудованим гетеродином U1, НЧ-фільтра C13, узгоджувального підсилювача H4 складової опорного сигналу U3, підсилювача-обмежувача U2. Канал вимірювального сигналу складається із фотодіода D2, резонансного підсилювача (елементи M2, C<sub>dop.4</sub>, L9, C<sub>dop.3</sub>, L7, L8), перемножувача U4, НЧ-фільтра C26, узгоджувального підсилювача НЧ-складової вимірювального сигналу U3, підсилювача-обмежувача U5.

Вимірювання поточної відстані проводиться шляхом непрямої реєстрації часу поширення зондуючого оптичного випромінювання до поверхні води у свердловині і назад. Часові вимірювання здійснюються шляхом порівняння початкових фаз ВЧ-сигналу, що модулює світловий потік, який зондує відстань до водної поверхні, і сигналу, що пройшов часову оптичну лінію затримки, якою є відкрита оптопара рівнеміра. Час запізнення оптичного випромінювання при поширенні вздовж стовбура свердловини туди і назад пропорційний зсуву фаз між випроміненим і прийнятим відбитим сигналами визначеної частоти та вимірюваній відстані. Дана залежність лінійна.

Алгоритм вимірювання реалізований у принциповій схемі рівнеміра наступним чином. ВЧ-сигнал з

кварцованого задавального генератора, реалізованого на мікросхемі U9, через підсилювач потужності U7 надходить на ключовий каскад Q1, навантаженням котрого є лазерний діод D3. Модульований оптичний сигнал з лазерного діода за допомогою однолінзової оптичної системи випромінюється у напрямку дна свердловини.

Одночасно через прозоре вікно у тілі об'єктива випромінювача початковий оптичний сигнал попадає на фотоприймач D1 каналу опорного сигналу. Відбившись від поверхні поплавця, який знаходиться на поверхні води, світловий сигнал через приймальну оптичну систему надходить на фотоприймач D2.

Підсилений по амплітуді резонансним підсилювачем на малошумлячому польовому транзисторі M2, електричний сигнал з узгоджувальної вторинної обмотки контуру L7, L8 надходить на перемножувач U4. На інший вхід перемножувача надходить сигнал з гетеродина, що входить у склад мікросхеми перемножувача U1 каналу опорного сигналу. З виходу перемножувача відфільтрована за допомогою конденсатора C26 НЧ-складова сигналу надходить на лінійний узгоджувальний підсилювач U3. З виходу U3 сигнал надходить на вхід підсилювача-обмежувача U5.

На виході JH5 підсилювача-обмежувача формується НЧ-сигнал прямокутної форми типу "меандр", початкова фаза котрого відповідає початковій фазі модульованого ВЧ-сигналом оптичного сигналу, що пройшов вимірювану відстань туди і назад. Канал опорного сигналу по схемній реалізації повністю ідентичний каналу вимірювального сигналу. Таким чином, на виходах опорного та вимірювального каналів формуються НЧ-сигнали прямокутної форми, початкові фази котрих зсунуті один відносно іншого на величину, пропорційну відстані до рівня води у свердловині. У подальшому сигнали

надходять на пристрій узгодження GSM-модему.

Блок обробки та передачі інформаційного сигналу рівнеміра базується на GSM-модемі. Інтерфейс взаємообміну даними між лазерним рівнеміром, встановленим у площині верхнього зрізу свердловини гідрометричного поста, і GSM-терміналом, здійснює управління режимом роботи ЛР, запис вимірної інформації про текучий рівень води у свердловині, а також пересилання інформації по каналах стільникового зв'язку в центр збирання та обробки даних.

Вибраний GSM-термінал GD-06 (рисунок 3.4) [23], входить до складу вимірювальної системи гідрометричного поста, містить 6 каналів вводу-виводу цифрової або аналогової інформації та сигналів управління зовнішніми пристроями.

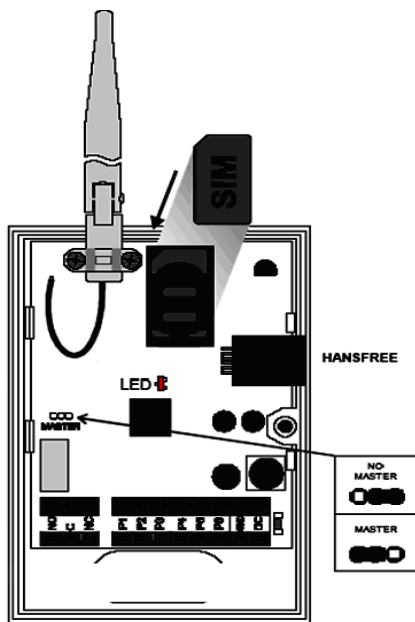


Рисунок 3.4. GSM-термінал GD-06

Встановлене підприємством-виробником програмне забезпечення вбудованого мікроконтролера GSM-терміналу максимально відповідає задачам побудови розробленої системи моніторингу.

Управління алгоритмом обробки вхідних сигналів, формування керуючих команд і режиму обміну даними через GSM-мережу програмується за допомогою передачі на модуль командних SMS-повідомлень заданого формату [23, 24]. Зміна режиму роботи GSM-терміналу можлива тільки при наявності у керуючому SMS-повідомленні ідентифікаційного коду доступу.

Програмування GSM-терміналу для організації алгоритму вимірювання поточного значення рівня води на контрольованому гідрометричному посту необхідно здійснювати у наступній послідовності.

1. Початкове введення номерів абонентів мережі, з котрими здійснюється взаємообмін даними і командами керування. Реалізується за допомогою наступного тексту SMS-повідомлення:

MASTER TEL1...8 SMSD 80963110045, де  
TEL1...8 – один із 8-ми абонентів стільникового зв'язку;  
SMSD – спеціальне SMS для автоматичного прийому даних.

2. Кожний із 6-ти каналів підключення зовнішніх пристроїв до GSM-терміналу запрограмований на прийом вхідного сигналу і на формування сигналу керування зовнішніми пристроями. Реалізується за допомогою наступного SMS-повідомлення:

MASTER P(1...6) IN(OUT) T(1...8) Y 0...60s, m, h,  
де P(1...6) – номер каналу;

IN(OUT) – використання каналу як вхід або вихід;

T(1...8) – з номеру якого абонента дозволено керування;

Y – вид дії;

0...60s, m, h – час дії команди у секундах, хвилинах, годинах.

Для рішення задачі роботи канали P1...P3 програмуються як входи, канал P4 – як вихід.

3. Програмування циклічного періоду відсилки інформаційного повідомлення з вимірювальною та службовою інформацією в адресу центра збирання і обробки інформації реалізується за допомогою SMS-повідомлення:

MASTER TEL1...8 SMSD PER,

де TEL1...8 – номер одного з 8-ми телефонів абонентів стільникової мережі, записаних у пам'ять GSM-терміналу;

SMSD – вид SMS-повідомлення;

PER– період регулярної передачі значень параметрів вимірювальної та службової інформації (часи, хвилини у виді 00:05).

4. Введення значення коду доступу для керуючих SMS-повідомлень. Код вводиться за допомогою відсилки керуючого SMS-повідомлення:

MASTER T, DTMF XXX,

де T – час прийому керуючого DTMF-коду (0-60 с);

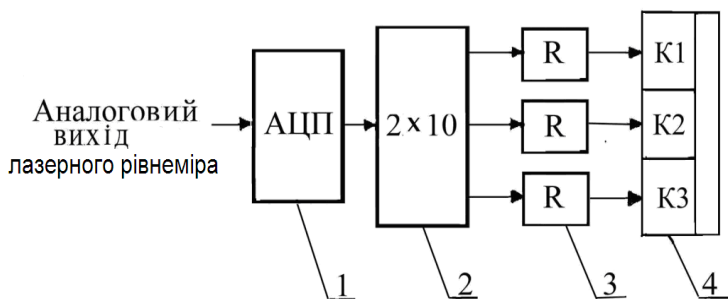
DTMF – формат сигналу (тоновий набір з клавіатури телефону);

XXX – цифрове значення коду.

При надходженні SMS-команди GSM-термінал переходить в режим очікування в перебігу часу прийому коду в DTMF-форматі. Після закінчення встановленого часу значення коду запам'ятовується і наступне SMS-повідомлення виконується у випадку присутності даного коду. Тексти SMS-повідомлень гідрометричних постів сортуються та обробляються у програмному середовищі комп'ютера центру збору та обробки інформації про водний об'єкт.

Узгоджувальний пристрій, структурна схема якого приведена на рисунку 3.5, погоджує динамічний діапазон аналогового вихідного сигналу лазерного рівнеміра з

розрядністю АЦП вхідних каналів GSM-терміналу. Алгоритм перетворення вихідного сигналу рівнеміра зв'язується з особливостями представлення вихідної інформації GSM-терміналу в SMS-форматі. Для передачі по телеметричному каналу всього динамічного діапазону вихідного сигналу з точністю, не гірше 1 см, розрядність вхідних АЦП -терміналу досягатиме не менш 10 (1024 рівня). Реальна розрядність АЦП будь-якого із вхідних каналів GSM-терміналу складає 6 (128 рівнів). За допомогою GSM-терміналу GD-06 розроблено порозрядний метод передачі поточного значення вихідної напруги лазерного рівнеміра. Метод реалізується шляхом передачі кожного із розрядів цифрового значення величини вихідного сигналу лазерного рівнеміра по окремому каналу передачі даних GSM-терміналу.



**Рисунок 3.5. Структурна схема узгоджувального пристрою**  
**1 – 10-ти розрядний АЦП;**

**2 – перетворювач двійкового коду у двійково-десятичний;**

**3 – три ідентичні резистивні матриці;**

**4 – вхідні канали GSM-терміналу.**

Алгоритм роботи узгоджувального пристрою наступний. Вихідний аналоговий сигнал ЛР надходить на вхід 10-розрядного АЦП. З виходу АЦП поточне значення вихідного сигналу ЛР у цифровому виді надходить на вхід перетворювача двійкового коду у

двійково-десятичний.

Двійково-десятичний цифровий код кожного із розрядів числового значення вихідного сигналу ЛР подається на резистивні матриці, що уявляють собою найпростіші ЦАПи. На виході матриць формуються аналогові сигнали, амплітуда котрих відповідає вхідному двійково-десятичному коду з величиною 1 вольт/1 розряд.

Вихідні аналогові сигнали резистивних матриць подаються на аналогові входи АЦП каналів K1, K2, K3 GSM-терміналу. Перетворені цифрові значення трьох розрядів величини вихідного сигналу ЛР через GSM-термінал у формі SMS-повідомлення передаються в центр збирання і обробки даних гідрометричних постів.

Програма обробки SMS, що надходять до центру збирання і обробки даних, із цифрових значень сигналів трьох каналів формує початкове 10-розрядне цифрове значення величини дистанції до дзеркала води у свердловині гідрометричного поста.

Таким чином, в результаті проведених досліджень:

- розроблений інтерфейс взаємообміну даними між лазерним рівнеміром і GSM-терміналом, що здійснює управління режимом роботи лазерного рівнеміра, запис вимірної інформації та пересилання інформації по каналах стільникового зв'язку в центр збирання та обробки даних,
- розроблена структура керуючих SMS-повідомлень для програмування GSM-терміналу та організації алгоритму вимірювання поточного значення рівня води у свердловині на контрольованому гідрометричному посту,
- розроблений порозрядний метод передачі поточного значення вихідної напруги ЛР за допомогою GSM-терміналу для точної передачі всього динамічного діапазону вихідного сигналу, зв'язаний з особливостями представлення вихідної інформації в SMS-форматі,
- розроблений алгоритм роботи узгоджувального пристрою

для погодження динамічного діапазону аналогового вихідного сигналу лазерного рівнеміра з розрядністю АЦП вхідних сигналів GSM-терміналу.

Основними вимогами при виборі апаратного та адаптації програмного забезпечення центру збирання і обробки даних, які надходять від лазерного рівнеміра системи постів гідрометричного контролю водного об'єкта, є надійність і точність одержання інформації.

У якості приймача сигналу GSM-мережі використовується GSM-термінал центру збирання та обробки даних. Для взаємозв'язку GSM-пристрою центру збирання та обробки даних з GSM-терміналами гідрометричних постів обраний термінал SL45 фірми Siemens як найбільш використовуваний пристрій для розв'язання подібних задач, що володіє гнучким програмним забезпеченням вбудованого мікроконтролера.

Можливе перепрограмування терміналів Siemens під прикладні задачі. Для зв'язку GSM-терміналу SL45 з комп'ютером використаний узгоджувальний кабель, до складу якого входить інтерфейсна мікросхема PC-2303HX фірми PROLIFFIC, що здійснює трансляцію даних із USB-порту на віртуальний COM-порт комп'ютера.

Більшість комп'ютерних програм взаємодії з GSM-терміналами використовують COM-порти. Але для розв'язання поставленої задачі зручніше користуватися USB-портами. Ефективним виявляється застосування технології USB-COM, яка створює віртуальний COM-порт, доступний програмам. Для управління режимами роботи автоматичного ЛР, запису, обробки і зберігання у виді бази даних інформації, яка надходить з гідрометричних постів, використовується адаптоване під потреби системи програмне середовище Siemens Mobile Control [25].

Основне робоче вікно програми, а також відкрите вікно режиму «Установки» наведено на рисунку 3.6.



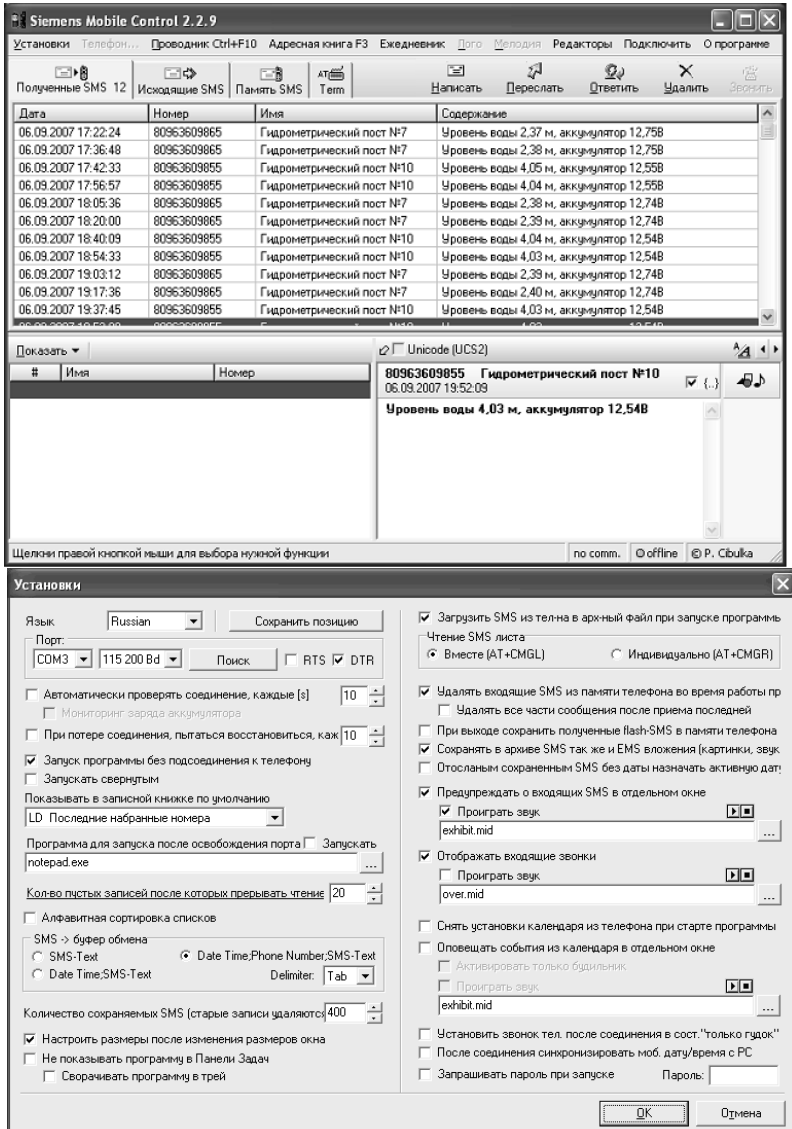


Рисунок 3.6. Рабочее окно программы Siemens Mobile Control

Після підключення GSM-терміналу Siemens SL45 до комп'ютера і завантаження програми всі SMS-повідомлення в автоматичному режимі переносяться із пам'яті терміналу в папку "Одержані SMS". У випадку переповнення пам'яті SMS-терміналу програма проводить її очищення.

В робочому вікні програми у базі даних зберігаються наступні основні та службові дані:

- У стовпці "Дата" – дата і час відправлення поточного SMS.
- У стовпці "Номер" – номер у GSM-мережі модему поточного гідрометричного поста.
- У стовпці "Ім'я" приведено реєстраційний номер поточного гідрометричного поста.
- У стовпці "Зміст" збережена основна вимірювальна інформація про рівень води у свердловині, а також службова інформація про стан акумуляторних батарей.
- У папці "Вихідні SMS" зберігаються дані про запитані SMS, що автоматично відсилаються.

Установка параметрів автоматичної розсилки запитаних SMS для всіх включених в систему гідрометричних постів здійснюється у режимі "Щоденник". За допомогою цієї опції програми встановлюється кількість запитаних SMS і час їх відправки у перебігу кожної доби (8.00 і 20.00 – загально прийнятий час вимірів рівня води в системі гідрометричного контролю). Дані, що зберігаються в папці "Одержані SMS" для подальшої обробки (обчислення середнього рівня за період часу, одержання графічного представлення часових залежностей), переводяться у формат "Excel" Microsoft Office.

Зовнішній вигляд бази даних у форматі «Excel» Microsoft Office наведений на рисунку 3.7.

	A	B	C	
1	06.09.2007 17:22	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,37 м, аккумулятор 12,75В
2	06.09.2007 17:36	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,38 м, аккумулятор 12,75В
3	06.09.2007 17:42	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,05 м, аккумулятор 12,55В
4	06.09.2007 17:56	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,04 м, аккумулятор 12,55В
5	06.09.2007 18:05	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,38 м, аккумулятор 12,74В
6	06.09.2007 18:20	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,39 м, аккумулятор 12,74В
7	06.09.2007 18:40	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,04 м, аккумулятор 12,54В
8	06.09.2007 18:54	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,03 м, аккумулятор 12,54В
9	06.09.2007 19:03	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,39 м, аккумулятор 12,74В
10	06.09.2007 19:17	80963609865	Гидрометрический пост №7	Уровень воды 2,40 м, аккумулятор 12,74В
11	06.09.2007 19:37	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,03 м, аккумулятор 12,54В
12	06.09.2007 19:52	80963609865	Гидрометрический пост №10	Уровень воды 4,03 м, аккумулятор 12,54В
13				
14				
15				
16				
17				

**Рисунок 3.7. Зовнішній вигляд бази даних у форматі «Excel» Microsoft Office**

Таким чином:

- обґрунтована структура та апаратно-програмне забезпечення приймальної частини центру збирання та обробки даних;
- проведена адаптація програмного середовища Siemens Mobile Control під потреби системи гідрометричного моніторингу;
- здійснено об'єднання розроблених пристроїв, які є складовими частинами системи моніторингу (рівнемір, GSM-телеметричне устаткування) з керуючим комп'ютером центру збирання інформації.

Для підвищення точності вимірювання поточного рівня води у блоці обробки вимірювального і опорного сигналів застосовуються операційні підсилювачі з частотою одиничного підсилення і максимальною швидкістю зростання вихідної напруги. Введена схема автобалансу постійного зміщення тракту покращує температурну стабільність результатів вимірювань.

Структурна схема системи моніторингу з адаптованим під її потреби програмним середовищем Siemens Mobile Control наведена на рисунку 3.8 [26]. Система складається із наступних пристроїв та вузлів:

- 1 – лазерний рівнемір,
- 2 – транзисторний ключ,
- 4 – аналогово-цифровий перетворювач АЦП (12 розрядів),
- 5 – GSM-модем SIM-300,
- 6 – SIM-карта, що дозволяє одержати ідентифікаційний номер у GSM-мережі,
- 7 – стабілізатор напруги живлення,
- 8 – акумулятор,
- 9 – GSM-оператор,
- 10 – GSM-модем,
- 11 – центр збирання і обробки даних.

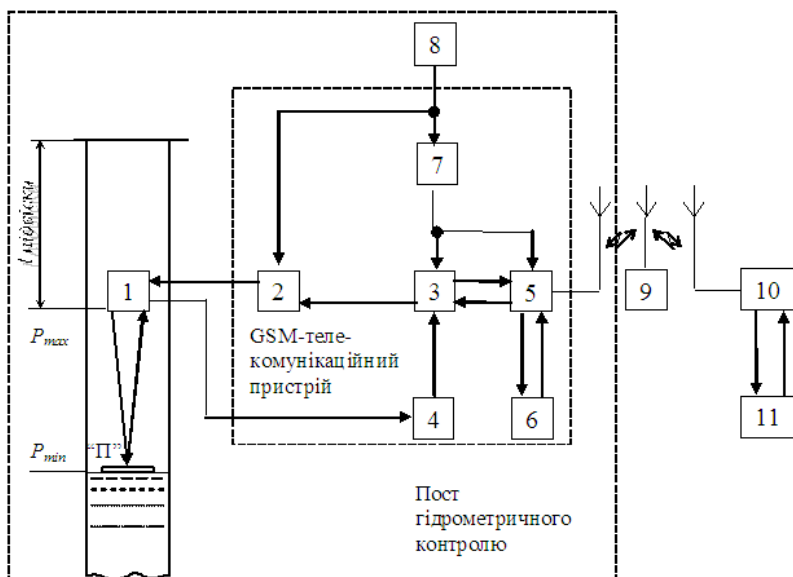


Рисунок 3.8. Структурна схема системи моніторингу рівня води

Структура системи моніторингу складається з лазерного телекерованого рівнеміра і GSM-пристрою „Рівень”. Алгоритм роботи встановлює функціональне призначення кожного елемента системи і перетворення інформаційного сигналу в процесі його обробки.

Вибрані для системи моніторингу GSM-термінали, а саме GM 9/18 та GD-06, функціональний склад і можливості інтегрованого програмного середовища котрих дозволяють розв’язати основну задачу системи, мають велику вартість – більш \$800.

З метою загального здешевлення системи моніторингу і на основі аналізу структури та програмних можливостей промислових зразків GSM-терміналів, розроблений пристрій керування і телекомунікації “Рівень”, основними елементами якого є мікроконтролер “Atmega-64” і GSM-модем SIM-300.

Лазерний рівнемір 1 і GSM-телекомунікаційний пристрій встановлюються у приміщенні поста гідрометричних спостережень. Лазерний рівнемір розташовується у мірній свердловині на 10 см вище максимально зареєстрованого рівня води.

Вихідний кабель рівнеміра підключається до вхідного рознімання GSM-телекомунікаційного пристрою, який розміщується поблизу верхнього створу мірної свердловини.

Живлення системи здійснюється від акумулятора 8 (12 В; 200 А/год), що забезпечує безперервну роботу гідрометричного поста продовж 6 місяців без обслуговування.

Алгоритм функціонування системи моніторингу наступний. При подачі живлення на GSM-телекомунікаційний пристрій у перебігу 25 с здійснюється реєстрація у GSM-мережі і початкове завантаження програмного середовища.

На наступному кроці проводиться початкове калібрування системи. Для цього за допомогою еталонного мірного пристрою проводиться вимірювання відстані до поверхні поплавця “П”.

Виміряне значення за допомогою SMS-команди калібрування системи виду \*Y1\*ZZZ, де ZZZ – виміряне з необхідною точністю поточне значення відстані до дзеркала води у свердловині, передається через GSM-мережу на телекомунікаційний пристрій.

Дане значення прирівнюється до вимірюваного лазерним рівнеміром поточного рівня води у свердловині і всі наступні виміряні значення нормуються відносно каліброваного значення.

Після проведення процедури калібрування устаткування поста готове до вимірювань поточного рівня води у мірній свердловині.

Для проведення виміру комп’ютер 11 центру збирання і обробки даних за допомогою GSM-модему 10 через GSM-оператора 9 спрямовує керуюче SMS-повідомлення виду \*M1\*t\*ТЕКСТ на телефонний номер GSM-модему вимірювальної системи поста.

При одержанні керуючого SMS-повідомлення такого і тільки такого формату керуючий мікроконтролер GSM-телекомунікаційного пристрою системи поста за допомогою ключа 2 здійснює подачу напруги на лазерний рівнемір 1 у перебігу часу “t”, що вказаний у тексті керуючого SMS-повідомлення. По закінченні часу виміру, необхідного для завершення перехідних процесів у схемі рівнеміра, за допомогою АЦП 4 проводиться вимірювання вихідного рівня сигналу рівнеміра.

Розраховане мікроконтролером 3 поточне значення рівня води у мірній свердловині, переведене у SMS-формат, відсилається на номер абонента GSM-мережі, який прислав команду проведення вимірювань.

Таким чином, досягається можливість оперативних вимірювань і калібрування апаратури поста з будь-якого мобільного телефону за умови відсилки правильних керуючих команд.

Керування часовим режимом збирання даних з гідрометричних постів, включених у систему, а також організація бази одержаних даних здійснюються у комп'ютері центра управління за допомогою програмного середовища "SiMoCo".

Результатами проведених досліджень є:

- розробка алгоритму функціонування контрольно-вимірального частини системи моніторингу,
- розробка програмного забезпечення автоматичної послідовності дій складових частин системи моніторингу,
- забезпечення оперативних вимірювань і калібрування апаратури поста будь-яким абонентом GSM-мережі, що відправив запит у вірному форматі.

Формат є паролем, тобто всі випадкові повідомлення, що надходять, не можуть викликати помилкові дії системи моніторингу.

Система моніторингу складається з двох компонентів:

- високоточного автономного лазерного телекерованого рівнеміра з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками для вимірювання рівня води у свердловинах гідрологічних постів спостереження за відкритими водними об'єктами.
- GSM-телекомунікаційного пристрою "Рівень", що керує режимом роботи рівнеміра, здійснює запис та пересилання вимірної інформації по каналах стільникового зв'язку за допомогою SMS-повідомлень в центр збирання та обробки даних.

### **3.4. Натурні випробування системи моніторингу рівня води**

Першою складовою методики випробування системи моніторингу є методика випробування ЛР, як засобу вимірювання рівня води у водоймах та водотоках, на базі діючих державних стандартів та державних перевірочних схем [26]. Відповідно методиці визначені основні технічні характеристики зразка рівнеміра, такі як рівнемірна характеристика, точність та часова стійкість вимірювань.

Для GSM-телекомунікаційного пристрою “Рівень”, як частини інформаційної вимірювальної системи моніторингу, комплекс нормованих метрологічних характеристик не визначений в зв’язку з відсутністю таких пристроїв промислового виробництва.

Аналіз переліку виконуваних GSM-пристроєм “Рівень” функцій дозволив виділити найбільш вагомі для виникнення похибок у вимірювальному процесі. Такими є інтервал часу між відправкою запиту і одержанням відповіді від ЛР та імовірність зникнення пакету даних у мережах GSM.

Виходячи з цього розроблена методика проведення комплексних експериментальних випробувань системи моніторингу [27 - 30].

Для вимірювання технічних характеристик дослідного зразка системи моніторингу виконуються наступні операції:

- вимірювання характеристик автономного лазерного телекерованого рівнеміра за допомогою розробленої методики, в автоматичному режимі, імітуючи безперервне функціонування системи в польових умовах,



- керування автономного ЛР в автоматичному режимі за допомогою SMS-повідомлень–запитів по каналах стільникового зв'язку.

Інтервал відсилання SMS-повідомлень, що формується за допомогою керуючої програми комп'ютера центра накопичення та обробки даних, скорочується до 5-ти хвилин;

- вимірювання технічних характеристик системи моніторингу при різних температурах, що дозволяє визначати температурну залежність рівнемірної характеристики,

- тестування програмного забезпечення збирання, накопичення та обробки даних, що надходять від автономного ЛР, тобто отриманих SMS-повідомлень–відповідей.

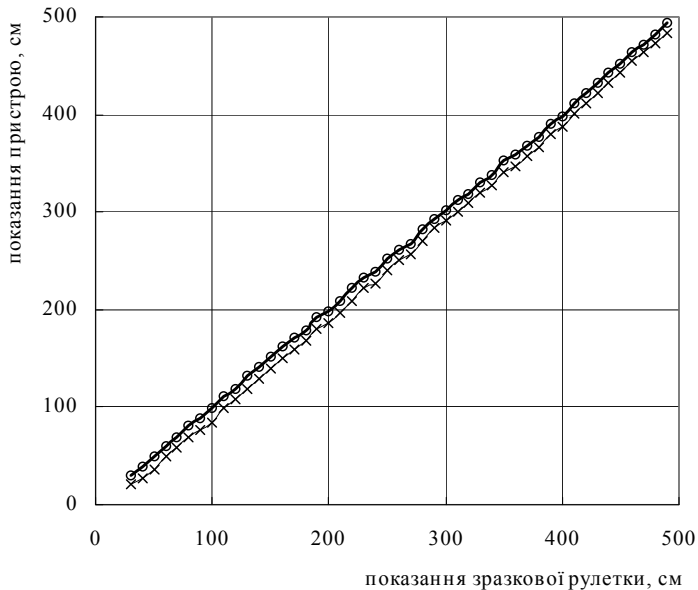
За отриманими результатами температурних досліджень, що представлені на рисунку 3.9, виявлені характер та розмір впливу на рівнемірну характеристику системи коливань температури у діапазоні 10...20°C, яка є типовою для існуючих наглядових свердловин.

В усьому діапазоні вимірювань системи гідромоніторингу абсолютна точність виміру глибини лінійно зменшується.

Для отримання необхідної точності вимірювань до обчислювальної програми мікроконтролеру GSM-телекомунікаційного пристрою “Рівень” вводиться корегуючий коефіцієнт.

В результаті випробувань встановлено:

1. Основна похибка вимірювання рівня не перевищує 1 %.
2. Середній часовий інтервал між SMS-повідомленням–запитом та SMS-повідомленням–відповіддю дорівнює 30...40 с.



**Рисунок 3.9.** Температурна залежність рівнемірної характеристики  
 ○ –  $t = 20^{\circ}\text{C}$ ; × –  $t = 10^{\circ}\text{C}$

Програмне забезпечення включає ввід, збір накопичення і обробку даних, що надходять від лазерного телекерованого рівнеміра у складі вимірювальної системи моніторингу рівня води. В програму обробки даних про рівень води входить розрахунок середнього добового рівня, середнього за місяць та вибір найвищого та найнижчого рівня.

Для проведення натурних випробувань системи моніторингу рівня води найбільш придатними виявилися умови, що існують у Гідрометеорологічному центрі Чорного та Азовського морів Державної гідрометеорологічної служби Міністерства надзвичайних ситуацій України, в структурі якого використовуються наглядові свердловини з глибиною рівня води 1 м.

Польові випробування системи гідромоніторингу проведено на свердловині у селищі Маяки Одеської області на базі гідрологічної станції Українського екологічного університету. Підготовка до випробувань передбачає узгодження конструкційних та функціональних параметрів системи моніторингу з характеристиками обраної свердловини.

Методика випробувань розроблена спільно зі співробітниками Одеського національного університету імені І. І. Мечникова, авторами монографії, та представниками Гідрометеорологічного центру Чорного та Азовського морів Державної гідрометеорологічної служби Міністерства надзвичайних ситуацій України.

Натурні випробування системи моніторингу проведені сумісно.

Методика випробувань технічних засобів системи в польових умовах, з урахуванням методики лабораторних випробувань, передбачає використання наступних зовнішніх умов функціонування пристрою:

- глибина дзеркала води – не більш 10 м,
- сезонні коливання рівня води – 3...7 м,
- відносна вологість повітря – 75...90 %,
- сезонні коливання температури у стовбурі свердловини – 5°C (10...15°C).

В процесі натурних випробувань в якості еталонних використовувались показання самописа рівня води “Валдай”, встановленого стаціонарно у гідрометричній свердловині.

Час і період вимірювання показань самописа “Валдай” синхронізувались з вимірюваннями у системі моніторингу.

Показання самописа рівня води “Валдай” зведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

## Показання самописа “Валдай”

Номер виміру	Час виміру, год.	Вимірний рівень, м
1	08.00.00	1,00
2	10.00.00	1,01
3	12.00.00	1,00
4	14.00.00	1,02
5	16.00.00	1,03
6	18.00.00	1,02
7	20.00.00	1,01
8	22.00.00	1,01
9	24.00.00	1,03
10	02.00.00	1,07
11	04.00.00	1,08
12	06.00.00	1,07
13	08.00.00	1,05
14	10.00.00	1,02
15	12.00.00	1,00
16	14.00.00	1,00
17	16.00.00	1,01
18	18.00.00	1,02
19	20.00.00	1,01
20	22.00.00	1,03
21	24.00.00	1,06
22	02.00.00	1,08
23	04.00.00	1,06
24	06.00.00	1,03

Зовнішній вигляд бази даних результатів натурних випробувань системи моніторингу рівня води у складі лазерного телекерованого рівнеміра та GSM-телекомунікаційного пристрою “Рівень”, згідно методики у форматі “Excel” Microsoft Office, наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

### База даних результатів натурних випробувань системи моніторингу рівня води

	A	B	C	D	E
1	Номер виміру	Час відправлення	Час прийому	Часовий інтервал виміру, с	Випірний рівень, м
2	1	8.00.00	8.00.35	35	1,00
3	2	10.00.00	10.00.30	30	1,01
4	3	12.00.00	12.00.38	38	1,00
5	4	14.00.00	14.00.36	36	1,02
6	5	16.00.00	16.00.39	39	1,03
7	6	18.00.00	18.00.40	40	1,02
8	7	20.00.00	20.00.38	38	1,01
9	8	22.00.00	22.00.36	36	1,01
10	9	24.00.00	24.00.39	39	1,03
11	10	02.00.00	02.00.40	40	1,06
12	11	04.00.00	04.00.36	36	1,08
13	12	06.00.00	06.00.38	38	1,07
14	13	08.00.00	08.00.39	39	1,05
15	14	10.00.00	10.00.37	37	1,02
16	15	12.00.00	12.00.37	37	1,00
17	16	14.00.00	14.00.39	39	1,00
18	17	16.00.00	16.00.40	40	1,01
19	18	18.00.00	18.00.38	38	1,02
20	19	20.00.00	20.00.35	35	1,01
21	20	22.00.00	22.00.37	37	1,03
22	21	24.00.00	24.00.38	38	1,06
23	22	02.00.00	02.00.40	40	1,08
24	23	04.00.00	04.00.37	37	1,05
25	24	06.00.00	06.00.38	38	1,03

Система моніторингу пройшла натурні випробування у нормальних кліматичних умовах згідно з методикою лабораторних випробувань.

Основна похибка вимірювання рівня коливається у межах 1 см, середній часовий інтервал між SMS-повідомленням–запитом та SMS-повідомленням–відповіддю дорівнює 30...40 с. Розрахункові значення основної похибки системи оперативного автоматичного моніторингу рівня води наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

### Основна похибка вимірювання рівнів

Показання самописа “Валдай” $H_c$ , м	Показання лазерного рівнеміра $H_{вр}$ , м	Основна похибка вимірювань $\Delta H_{оп} = H_{вр} - H_c$ , см
1,07	1,06	1
1,06	1,05	1

### 3.5. Практичне використання системи гідромоніторингу

Інформація про стан гідросфери використовується у сільському господарстві, транспорті, водопостачанні, у попередженні про стихійні лиха [31–32]. У теперішній час діють біля 60 тис. водомірних постів і станцій.

Можливості оперативного моніторингу рівня води визначаються об’ємом і якістю опорної інформації на контрольно-вимірювальних ділянках.

Моніторинг рівня води дозволяє одержати картину просторової та часової зміни стану водного об’єкта, вивчити картину розвитку водних мас як на контрольно-вимірювальних ділянках, так і у всьому водоймищі.

Однією з найбільш важливих задач дослідження стану водних ресурсів по даним дистанційного зондування

в оптичному діапазоні має визначення рівня води досліджуваного об'єкта. При цьому переважаючим параметром в розробці рівнемірів повинен бути великий діапазон і висока точність вимірювання рівня протягом всього періоду вимірювань. Оцінка і облік впливу різних факторів на точність вимірювальної інформації дозволяє підвищити достовірність результатів та розробити методику виконання вимірювань ЛР.

Практична цінність складається з рішення проблеми підвищення якості і ефективності вимірювань рівня води у відкритих водоймах. Основними вимогами при виборі апаратного та програмного забезпечення центру збирання і обробки даних, що надходять від автоматичних лазерних рівнемірів системи постів гідрометричного контролю водного об'єкта, є надійність і точність одержання інформації. ЛР для вимірювання рівня води у свердловинах гідрологічних постів спостереження за відкритими водними об'єктами дозволяє проводити вивчення режиму рівнів води у відкритих водоймах, що має велике практичне значення, яке полягає у можливостях раціонального використання води в господарській діяльності. Точне вимірювання рівня води необхідно для судноплавства, побудови різних гідротехнічних споруд, мостів та проведення меліоративних заходів.

Практична цінність системи контролю рівня води у відкритих водоймах полягає в тому, що вона працює в автоматичному режимі і передає результати вимірювань на десятки кілометрів. Для зв'язку між дільницями системи та центром збору та обробки інформації використовується стільникова мережа стандарту GSM, яка має низьку вартість послуги та зручний сервіс доставки. Для взаємообміну даними застосовується SMS-технологія, як найбільш надійна та наочна. Оснащення водомірних постів системою гідромоніторингу має економічну цінність для

диспетчерської служби на гідроелектростанціях, шлюзах, водосховищах, оскільки дозволяє дистанційно здійснювати налагодження обладнання поста і не потребує постійного обслуговування спостерігачем.

Практична цінність розроблених технічних засобів контролю рівня води та зв'язку між інформаційним центром і периферійними контрольно-вимірювальними пристроями полягає у випереджальному протипаводковому оповіщенні населення та забезпеченні екологічної безпеки. SMS-повідомлення про зміни стану рівня води надходять до центру збирання та обробки інформації і до усіх абонентів GSM-мережі, що дозволяє проводити оперативний збір інформації і постійний моніторинг рівня води та попереджати катастрофічні наслідки паводків.

Система гідромоніторингу рівня води у відкритих водоймах та інших модифікаціях, з урахуванням місцевих умов, придатна для використання в Україні (Придунав'я, Придністров'я та ін.), а також в інших країнах, які потребують розв'язання подібних задач.

Моніторинг водотоків та водойм, у тому числі при аварійних ситуаціях, використовується у системах раннього оповіщення про аварійні ситуації на трансграничних водних об'єктах, контролю стоків забруднюючих речовин на водоскидах промислових підприємств і об'єктах житлово-комунального та сільського господарства.

Економічний ефект та практична цінність системи гідромоніторингу полягають у можливості прогнозувати виникнення небезпеки та попередити катастрофічні наслідки паводків за рахунок точності вимірювань рівня води, швидкості і надійності одержання інформації по каналах стільникового зв'язку від постів гідрометричного контролю. Соціальний ефект – за рахунок попереднього протипаводкового оповіщення населення.



### Основні результати і висновки до розділу 3

Модель водного об'єкта, що ураховує його гідродинамічні і гідрофізичні параметри, придатна для вирішення задач еколого-гідрологічних досліджень та дозволяє визначити робочі межі вимірювального обладнання. Базою моделі є рівень води як основний параметр, оскільки дозволяє функціонально визначати об'єм водотоку та прогнозувати можливість виникнення затоплень.

Метод визначення структури корисного і завадового сигналів, як складових оптичної хвилі, у відповідності з просторово-часовою залежністю локаційних сигналів, та методика оцінки інформативності відбитого випромінювання підвищують надійність і швидкодію вимірювань в оптичній локації.

Захищені патентами [11, 19, 27] оригінальні структура та алгоритм роботи системи моніторингу рівня води у відкритих водоймах у складі ЛР та GSM-телеметричного пристрою „Рівень”, що керує режимом роботи рівнеміра.

Система працює в автоматичному режимі і передає результати вимірювань за допомогою GSM-зв'язку в інформаційний центр, що забезпечує отримання надійної інформації засобами телекомунікації в будь-який момент часу.

Економічний ефект та практична цінність системи полягають у можливості прогнозувати виникнення небезпеки та попередження катастрофічних наслідків паводків за рахунок точності вимірювань рівня води, швидкості і надійності одержання інформації по каналах стільникового зв'язку від постів гідрометричного контролю.

### Список використаних джерел до розділу 3

1. В. Н. Михайлов, М. В. Михайлов, В. Н. Морозов, М. В. Корнилов, В. Н. Худолеев. Катастрофический паводок на Дунае в августе 2002 г. // Метеорология и гидрология, 2004, № 1, С. 81–88.
2. Мониторинг, использование и управление водными ресурсами бассейна р. Прип'ять / Под общ. ред. М. Ю. Калинина и А. Г. Ободовского. Мн.: Белсэнс, 2003.
3. Г. С. Клейн, Б. Р. Неджиховский. О перспективах развития технических средств гидрологической информации / Сб.ст. Вопросы гидрологического приборостроения. Под ред. Г. С. Клейна. Л.: Гидрометеиздат, 1984, С. 3–92.
4. Карасев И. Ф., Васильев А. В., Субботина. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1991.
5. Тимченко В. М. Эколого-гидрологические исследования водоемов Северо-Западного Причерноморья // Отв. Ред. Вишневыский П. Ф. Киев: Наукова думка, 1990.
6. Субботин А. С. Гидрометрические сооружения. Л.: Гидрометеиздат, 1989.
7. Железняков Г. В. Гидрология и гидрометрия. М.: Высшая школа, 1981.
8. Дубинчук В. Т., Шустов В. М. Измерения при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М.: Недра, 1984.
9. Виглеб Г. Датчики. М.: Мир, 1989.
10. Сантоний В. И., Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Смынтына В. А. Применение лазерного уровнемера в системе гидромониторинга // Матеріали Всеукр. н.-практ. конф. “Екологія міст та рекреаційних зон”, 4–5 червня 2009 р., Одеса, С. 278–281.
11. Патент України на корисну модель № 58288 G 01 F 23/00, 23/28, заяв. № u 2010 10734, пріор. 06.09.2010, публ.

- 11.04.2011, Бюл. № 7 “Пристрій вимірювання рівня”.  
Сминтина В. А., Сантоній В. І., Янко В. В., Иванченко І. О.,  
Будіянська Л. М.
12. Костецкая Я. М. Свето- и радиодальномеры.  
Львов.: Вища школа. Изд-во при Львовском  
государственном университете, 1986. 264 с.
13. Фирма «ТЭСС Электроникс», [www.telemetry.ru](http://www.telemetry.ru).
14. GSM коммунікатор GD-06 Allegro.  
[www.jablotron.com](http://www.jablotron.com)
15. Сантоний В. И., Иванченко И. А.,  
Будиянская Л. М., Смынтына В. А. Автоматическая  
система гидромониторинга // Збірн. наук. статей Міжнар.  
н.-практ. конф. “Екологічні проблеми Чорного моря”, 29–  
30 жовтня 2009 р., Одеса, С. 196–198.
16. Сантоний В. И., Янко В. В., Иванченко И. А.,  
Будиянская Л. М., Смынтына В. А. Система  
гидромониторинга для открытых водоемов // Екологія  
довкілля та безпека життєдіяльності. – 2009. – № 6. – 12 с.
17. Иванченко І. О., Сантоній В. І., Сминтина В. А.,  
Будіянська Л. М. Автоматична система оперативного  
екологічного моніторингу рівня води відкритих водойм та  
її інформаційне забезпечення // Збірник матеріалів міжнар.  
наук.-практ. конф. “Екологічні проблеми Чорного моря”,  
28–29 жовтня 2010 р., Одеса, С. 285–288.
18. Смынтына В. А., Сантоний В. И., Янко В. В.,  
Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Система  
гидромониторинга для открытых водоемов // Труды  
Десятой междунар. н.-практ. конф. “Современные  
информационные и электронные технологии” (СИЭТ-  
2009), 18–22 мая 2009 г., Одесса, т. II, С. 169.
19. Патент України на корисну модель № 60595  
G 01 F 23/28, 23/00, заяв. № и 2010 13880, пріор.  
22.11.2010, публ. 25.06.2011, “Автоматизована система

- гідромоніторингу”. Сминтина В. А., Сантоній В. І., Янко В. В., Іванченко І. О., Будіянська Л. М.
20. Янко В. В., Ваксман Ю. Ф., Молчанюк В. И. Проектирование и моделирование оптико-электронных сенсоров с применением языка Pspice // Тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф. “Сенсорна електроніка і мікросистемні технології” (СЕМСТ-1). Одеса, 2004. – С. 101.
21. Янко В. В. Динамическое PSpice моделирование оптических локаторов. Труды Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (СИЭТ-2006), Одесса, 22–26 мая, 2006, Т. I, С. 215.
22. Янко В. В. PSpice-моделирование оптико-электронных локаторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 4.– С. 14–17.
23. Буткевич Е. Л. Пишем программы для сотовых телефонов. СПб.: Питер, 2006.
24. Гвинель Ле-Бодик. Мобильные сообщения. Службы и технологии SMS, EMS и MMS. Москва: Кудиц-Образ, 2005.
25. cibulka.pavel@tiscali.cz
26. ГОСТ 8.321-78. Уровнемеры промышленного применения и поплавковые. Методы и средства поверки.
27. Патент України на корисну модель № 21631 G01C 3/08, заяв. № у 200611395, пріор. 30.10.2006 публ. 15.03.2007, Бюл. № 3. “Фазовий оптико-електронний далекомір”. Сантоній В. І., Янко В. В., Іванченко І. О., Будіянська Л. М.
28. Смынтына В. А., Сантоний В. И., Янко В. В., Будиянская Л. М., Иванченко И. А. Лазерный уровнемер для систем гидрометрического мониторинга. Матеріали Другої міжнар. н.-практ. конф. “Моніторинг навколишнього середовища: науково-методичне,

- нормативне, технічне, програмне забезпечення”, 24–28 вересня 2007 р., АР Крим, м. Коктебель, С. 96–98.
29. Сминтина В. А., Сантоній В. І., Янко В. В., Будіянська Л. М. Використання мереж GSM у системах гідрометричного моніторингу. Труды Восьмой междунар. н.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии», 21–25 мая 2007 г., г. Одесса, – С. 393
30. Сминтина В. А., Сантоній В. І., Янко В. В., Будіянська Л. М., Іванченко І. О. Система екологічного моніторингу рівня води у відкритих водоймах. Матеріали міжнар. н.-практ. конф. «Глобалізаційні процеси в природокористуванні », 19–23 травня 2008 г., АР Крим, м. Алушта, С. 45–47.
31. Колодєєв Є. І., Чернов М. І. Основи річкової гідрометрії. Одеса, 2002.
32. Гидрология суши / И. В. Шубаков, Д. И. Шубаков, Ж. А. Гардыман. Кн. 3. Одесса, 2003. – С. 8–9.

#### **4. ВІБРОДІАГНОСТИЧНА ДИСТАНЦІЙНА АВТОМАТИЧНА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА**

Проблеми боротьби зі шкідливим впливом вібрації на об'єкти існують в багатьох галузях сучасної техніки. Недооцінювання важливості цих проблем може мати наслідки виникнення руйнівних режимів роботи та негативних впливів на здоров'я та працездатність працівників.

Здебільшого вимірювання вібрацій проводяться методом механічного контакту датчика з джерелом вібрації. Для усунення впливу на досліджуваний об'єкт засобами вимірювання необхідні неконтактні методи та засоби вібраційного контролю, які не пов'язані з об'єктом механічним зв'язком.

Оптико-локаційні віброметри відкривають можливість впровадження новітніх технологій аналізу коливань об'єкта шляхом сканування поверхні та надання карти вібраційних даних.

Вимірювання вібраційних характеристик оптико-локаційним пристроєм дозволяє розв'язати проблему дистанційної реєстрації вібраційних коливань поверхні об'єктів та їх змін у часі, а також створити на його засаді систему автоматичного моніторингу вібраційних характеристик і полів об'єктів.

У вібродіагностичних дистанційних автоматичних вимірювальних системах участь людини необхідно мінімізувати за рахунок автоматизації зв'язку між досліджуваним об'єктом та центром збирання та обробки інформації з використанням стільникової мережі. Автоматичний моніторинг вібрацій в режимі on-line дозволяє своєчасно приймати заходи в разі нестандартного розвитку ситуацій.

#### **4.1. Методи та засоби вимірювання і аналізу параметрів вібрацій**

Існуючі технічні засоби вимірювання та аналізу вібрації класифікуються наступним чином:

- засоби контролю допуску і аварійного захисту,
- індикатори стану об'єктів,
- засоби вібраційного моніторингу і вібраційної діагностики,
- дослідницькі прилади і системи.

Прилади и системи контролю допуску і аварійного захисту є простими по глибині аналізу технічними засобами. Їх функцією є вимірювання величини віброшвидкості або віброзсуву в стандартній смузі частот (від 2 до 1000 Гц) і формування сигналу про перевищення їх допустимих значень [1, 2, 3].

Призначенням приладів, що виконують функції індикаторів стану, є раннє виявлення ознак одного (або групи) можливих дефектів контрольованого устаткування. З безлічі дефектів вибираються такі, які, з одного боку, просто та ефективно виявляються по сигналу вібрації, а, з іншого боку, присутні в будь-якому з ланцюжків дефектів, що швидко розвиваються в перед-аварійному стані контрольованого устаткування. Індикатори стану вимірюють вібрацію в достатньо широкій смузі частот до 20–30 кГц. Звичайно контролюється середньоквадратичне значення вібрації [4].

Складніші види аналізу можуть використовуватися в засобах вібраційного моніторингу. Основним призначенням засобів вібраційного моніторингу є виявлення необоротних змін устаткування і прогнозування швидкості їх розвитку. До додаткового завдання, яке може вирішуватися засобами моніторингу, можна віднести визначення причин виявлених змін. Це завдання

вирішується експертом, що аналізує результати моніторингу, зокрема із застосуванням спеціальних експертних програм.

В основу систем «прогнозуючого» вібраційного моніторингу устаткування покладений спектральний аналіз сигналів одного або декількох контролюючих віброметрів [4, 5]. Спектральний аналіз вібрації устаткування дозволяє виявити більше половини з можливих розвинених дефектів і на цій основі не пропустити жодного ланцюжка дефектів, що швидко розвиваються, безпосередньо перед аварією контрольованого устаткування. Саме тому системи вібраційного моніторингу є ефективним засобом попередження аварій.

Первинним елементом вібровимірювальної системи є вібродатчик. Існує дві групи методів вимірювання параметрів вібрації:

- контактні, що мають механічний зв'язок датчика з досліджуванним об'єктом, або датчик, розташований в безпосередній близькості до поверхні об'єкту (одиниці міліметрів),
- безконтактні, з датчиком, не пов'язаним з об'єктом механічним зв'язком і віддаленим від поверхні об'єкту на відстань, порівнянну з його розмірами і більшу.

В основі контактних методів лежить електромагнітний метод вимірювання вібрації. Залежно від виду використовуваного електромагнітного ефекту існує ряд віброперетворювачів, призначених для вироблення сигналу вимірювальної інформації про значення параметрів вібрації. Існують віброперетворювачі ємкісні, тензометричні, п'єзоелектричні, вихоротокові, індукційні, індуктивні, магніторезистивні, на ефекті Холу та ін. Найбільше застосування в техніці отримали п'єзоелектричні і вихоротокові контактні датчики вібрації.



Найпоширенішим типом контактних датчиків вібрації є п'єзоелектричні акселерометри, засновані на використанні прямого п'єзо ефекту. Основними перевагами акселерометрів можна вважати широку смугу вимірювань частоти вібрацій, що досягає десятків кілогерц, широкий діапазон вимірювання амплітуди прискорень від часток  $m/c^2$  до тисяч  $m/c^2$ , малу масу, компактність конструкції і відсутність необхідності в джерелі живлення. Проте вони не вільні від недоліків, до яких відноситься неможливість вимірювання незмінного прискорення фіксованої величини, мала чутливість в низькочастотному діапазоні, що вимагає застосування високоомних підсилювачів.

Вихоротоковий віброперетворювач заснований на збудженні і фіксації вторинних полів вихрових струмів, що наводяться в контрольованому об'єкті. Коливання металеві або металізованої поверхні об'єкта призводять до зміни активної та індуктивної складових опору сигнальної котушки, індуктивно пов'язаної з іншою котушкою, що живиться від генератора синусоїдальних сигналів фіксованої частоти.

Пріоритетною областю використання вихоротокових вимірників є контроль осьового зсуву і поперечного биття валів великих турбін, компресорів, електромоторів, в яких використовуються підшипники ковзання. Застосування для таких цілей датчиків швидкості і прискорення хоча і допустимо, але невиправдано, оскільки через зменшення коефіцієнта пропорційності між віброзсувом ротора і опори на низьких швидкостях обертання, а також значного (до 10 разів) ослаблення вібрації ротора масивним корпусом установки, результат матиме велику похибку.

Взагалі, контактні методи віброметрії забезпечують високу точність вимірювань в діапазоні низьких частот та відносно великих амплітуд вібрацій. За межами цього

діапазону їх застосування неможливе через властиву їм інерційність, а також спотворення характеру вимірюваних вібрацій.

Проте механічний зв'язок датчика з досліджуваним об'єктом далеко не завжди допустимий, тому останні роки основна увага приділяється розробці безконтактних методів вимірювання параметрів вібрацій. Крім того, їх загальним достоїнством є відсутність впливу на об'єкт і зневажливо мала інерційність.

Всі безконтактні методи засновані на зондуванні об'єкту звуковими хвилями, електромагнітними хвилями ВЧ- і СВЧ-діапазону, а також видимим світлом [6].

Одна з останніх розробок в ультразвуковій віброметрії ґрунтується на методі ультразвукової фазометрії [7]. Він полягає у вимірюванні поточного значення різниці фаз опорного сигналу ультразвукової частоти і сигналу, відбитого від досліджуваного об'єкта. Як чутливий елемент використовується п'єзоелектрична кераміка. На частоті ультразвуку 240 кГц чутливість вимірювання вібропереміщення – 10 мкм у діапазоні від 10 до 500 мкм, відстань до об'єкту – до 1,5 м; на частоті 32 кГц – чутливість 30 мкм, відстань до об'єкту – до 2 м. Із зростанням частоти зонduючого сигналу чутливість зростає. Як достоїнства методу відзначаються дешевизна і компактність апаратури, малий час вимірювання, відсутність обмеження частотного діапазону знизу, високу точність вимірювання низькочастотних вібрацій. Недоліками є значне загасання ультразвуку при поширенні в повітрі, залежність від стану атмосфери, зменшення точності вимірювання із зростанням частоти вібрації.

Частину цих недоліків усувається при застосуванні методів, заснованих на використанні СВЧ-випромінювання [8]. Вони підрозділяються на інтерференційні і резонансні. В основі інтерференційних методів лежить зондування

досліджуваного об'єкту хвилями ВЧ- і СВЧ-діапазонів, прийом і аналіз відбитих (розсіяних) об'єктом хвиль. Між випромінювачем і досліджуваним об'єктом в результаті інтерференції утворюється стояча хвиля.

Вібрація об'єкта призводить до амплітудної і фазової модуляції відбитої хвилі та утворення сигналу биття. У виділеного сигналу змінного струму амплітуда пропорційна вібропереміщенню, а частота відповідає частоті вібрації об'єкту.

Резонансні методи засновуються на розміщенні віброуючого об'єкта в полі СВЧ-резонатора (зовні або хоч би частково усередині нього), внаслідок чого змінюються характеристики резонатора [9, 10, 11]. Безконтактне вимірювання параметрів вібрацій резонансним методом можливо і при включенні приймально-передавальної антени в частотодавальний ланцюг СВЧ-генератора, тобто при роботі в автогенераторному режимі. Такі системи називаються автодинними генераторами або просто автодинами [12].

З метою підвищення роздільної здатності СВЧ-вібровимірювань застосовується метод відкритого резонатора [13]. Суть методу полягає у вимірюванні параметрів СВЧ-резонатора, що змінюються внаслідок вібрації досліджуваного об'єкта. Резонатор має два дзеркала, причому одне з них фіксоване, а інше механічно пов'язане з досліджуваним об'єктом.

Реєстрація переміщень при малих амплітудах вібрацій проводиться амплітудним методом по зміні вихідній потужності прохідної схеми включення резонатора або відбитої потужності, у разі застосування крайового включення. Цей метод вимірювання вимагає постійності потужності, що підводиться до резонатора, і високої стабільності частоти збудження.

У випадку великих амплітуд вібрацій реєструється зсув резонансної частоти, що можна зробити з дуже високою точністю. Для підвищення добротності і зменшення дифракційних втрат використовують сферичні дзеркала. Роздільна здатність даного методу – 3 мкм. Метод володіє малою інерційністю в порівнянні з описаним вище, але його застосування рекомендується, якщо маса дзеркала принципово менша маси досліджуваного об'єкта.

Найбільшого поширення серед безконтактних методів віброметрії набули методи, засновані на зондуванні об'єкта видимим світлом [14]. Основним джерелом випромінювання є лазер, що володіє вдалим поєднанням таких властивостей, як висока монохроматичність випромінювання, мала кутова розбіжність, когерентність і велика спектральна щільність енергії випромінювання. Завдяки цим властивостям збільшується дальність дії, а також досягається максимальна роздільна здатність і точність вимірювання лазерних віброметрів. Можливе вимірювання параметрів вібрації об'єктів, розташованих у важко доступних місцях, за склом, з перегрітою поверхнею та ін.

Всі основні методи віброметрії з використанням лазерів можна класифікувати за способом виділення інформації про параметри руху таким чином:

- інтерференційний,
- доплерівський,
- позиційно-чутливий,
- голографічний.

В інтерференційному віброметрі в результаті взаємодії прямого і відбитого від вібруючого об'єкта променів утворюється інтерференційна картина, що через щілину направляється на фотоприймач. При вібрації об'єкта інтерференційна картина пробігає мимо щілини і

створює електричні імпульси на виході фотоприймача, які і фіксуються. Інтерференційні віброметри дозволяють вимірювати вібраційні переміщення з амплітудами до половини довжини хвилі світла (долі мікрометра) і з частотою до десятків кілогерц. Проте практичне використання інтерференційних віброметрів стримується наявністю характерних недоліків, а саме, складністю компенсації робочої точки інтерферометра, викликані повільними змінами відстані до тестованого об'єкта, температури і тиску навколишнього середовища, жорсткими вимогами до юстирування.

У доплерівських установках використовується ефект зміни довжини хвилі (частоти) при русі джерела випромінювання відносно фотоприймача [15]. Різниця частота виділяється і вимірюється у фотоприймачі різними шляхами.

Сучасні лазерні доплерівські віброметри дозволяють вимірювати віброшвидкість величиною до  $\pm 500$  мм/с з розділенням 0,3 мкм/с в діапазоні частот від 0 до 20 кГц. Це – складні дорогі пристрої, оснащені потужним обчислювачем, що дозволяє врахувати і компенсувати всі неточності і нестабільності методу вимірювання.

Системи, в яких відбитий від об'єкта промінь світла потрапляє на поверхню позиційно-чутливого фотоприймача, відносяться до позиційно-чутливого методу віброметрії. Достоїнством методу є простота обробки сигналу матричного фотоприймача цифровими методами при мінімальній амплітуді вібрацій, що виявляються, в декілька мікрометрів. Похибка вимірювання складає 0,5–2,0 %.

Для дослідження дуже малих деформацій і вібрацій об'єктів застосовують голографічні пристрої. Голограма є зареєстрованою фотопластиною інтерференційною картиною, утвореною когерентним випромінюванням

джерела (опорним пучком) і випромінюванням, розсіяним об'єктом, який освітлюється тим же джерелом. Голографічна інтерферометрія дозволяє вимірювати амплітуди вібрацій об'єктів, рівні сотим долям мікрометра, в широкому діапазоні частот – до десятків кілогерц. Даний метод застосовується виключно в лабораторних дослідженнях.

Основна задача вібродіагностичного устаткування – отримання та збір даних про деформації, що відбуваються на спостережуваному об'єкті, і аналіз одержаної інформації. Система повинна інформувати користувачів про наявність неприпустимих відхилень відносно деякої заданої величини, а також відхилень, які відбуваються за будь-який проміжок часу, тобто при неприпустимо швидких змінах положення об'єкта.

Аналізу функціональних можливостей сучасних віброаналізаторів присвячені роботи фірм-розробників систем вібродіагностування, зокрема спектроаналізаторів вібрації [16, 17, 18].

Аналізатор вібрації повинен відповідати наступним вимогам:

- багатофункціональність і реєстрація декількох параметрів;
- простота використання і портативність;
- накопичення даних – результатів вимірювань;
- інформативність індикаторного екрану;
- програми експертно-інформаційного характеру: вбудовані і зовнішні;
- спеціалізовані вбудовані програми.

Відповідні вимоги до апаратури:

- багатофункціональність і реєстрація декількох параметрів;
- універсальність і модульний принцип побудови;
- простота використання і портативність;

- широкі можливості обробки і аналізу сигналу;
- графічні засоби відображення інформації;
- накопичення даних – результатів вимірювання;
- використання адаптивних автоматичних (експертних) систем діагностування, що настроюються: вбудованих і зовнішніх;
- спеціалізовані програми внутрішньо приладової діагностики.

Широкі можливості обробки і аналізу сигналу – це наявність засобів математичної обробки даних, що дозволяють представляти результати вимірювань в зручному для аналізу вигляді, наприклад представлення сигналу в часовій області з подальшим переходом в частотну область шляхом застосування методів перетворення Фур'є. Вище розглянуті критерії вибору засобів діагностування є експлуатаційно-конструкційними, що визначають умови і область застосування. Найважливішими також є і метрологічні характеристики, що визначають результати і похибки вимірювань.

Основними метрологічними характеристиками віброаналізаторів є частотний діапазон реєстрації параметрів вібрації, амплітудно-частотна характеристика первинних перетворювачів, динамічний діапазон вхідного сигналу, що вирішує здатність приладів в частотному діапазоні. Частотний діапазон для більшості завдань віброметрії міститься в межах від 2...5 Гц до 10...20 кГц.

Вимога до амплітудно-частотної характеристики первинних датчиків – висока лінійність, щоб нелінійні спотворення від сильних складових сигналу не заважали аналізувати слабкі складові.

Роздільна здатність оцінюється кількістю ліній (смуг) в спектрі сигналу. Стандартний ряд: 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400. Перевага віддається 400, 800, 1600 ліній.

Аналіз патентних матеріалів згідно з МКП по класу G01H 9/00 “ Вимірювання механічних коливань або УЗ, звукових або інфразвукових коливань з використанням засобів, чутливих до випромінювання, наприклад, оптичних засобів ” виявиво у базі даних Укрпатенту 9 патентів визначеного класу [18].

У патенті України [19] пропонується використання корисної моделі для вібраційного дослідження лопаток турбін двигунів. Згідно зі заявленим способом когерентне випромінювання поділяють на два паралельних пучки, фокусують їх на дві точки досліджуваної поверхні, формують із хвиль, які відбиваються нормально, інтерференційну картину та по зміні інтенсивності цієї картини з часом визначають відносну амплітуду коливань.

При цьому один з освітлюючих пучків обертають відносно оптичної вісі та визначають точку на досліджуваній поверхні, відносна амплітуда коливань якої дорівнює нулеві. Досліджувану поверхню переміщують відносно оптичної вісі таким чином, що визначена точка лінії рівних амплітуд збігається з відповідною точкою оптичної вісі, потім повторюють зазначені дії необхідну кількість разів для всієї поверхні.

Обертання одного з освітлюючих пучків відносно оптичної вісі забезпечує визначення наступної точки лінії рівних амплітуд на досліджуваній поверхні, що дозволяє отримати лінію рівних амплітуд коливань та автоматизувати процес вимірювання у реальному часі.

Патент України [20] заснований на методі лазерної інтерферометрії. Згідно зі задекларованим способом когерентне лазерне випромінювання поділяють за допомогою світлоподілювача на два пучки і фокусують на досліджувану та опорну поверхні. Із відбитих нормально хвиль формують інтерференційну картину та по зміні інтенсивності цієї картини з часом визначають нормальну



складову амплітуди коливань. Пристрій, що реалізує задекларований спосіб, забезпечує обертання пучка, який освітлює досліджувану поверхню, синхронно з обертанням об'єкта відносно спільної осі за допомогою двох дзеркал, розташованих на оптичній осі під кутом  $45^\circ$ .

У патенті України [21] пропонується пристрій для вимірювання малих лінійних переміщень об'єктів циліндричної форми по двом осям координат шляхом визначення зміщення центру розподілу інтенсивності світлової плями, утвореної в результаті відбивання лазерного випромінювання від об'єкта.

Вимірювання відбитого випромінювання проводиться за допомогою диференціального фотодіода з чотирма робочими площинами. Робочі площини генерують відповідні фотоструми, з яких у початковому положенні об'єкта формується нульове значення напруги, а в усіх інших випадках – відмінне від нуля. Відхилення значення напруги від нуля є мірою переміщення об'єкта від початкового положення.

Патент України [22] призначений для автоматичних безконтактних вимірювань параметрів вібрацій об'єктів. Спосіб вимірювання включає формування за допомогою напівпровідникового лазера світлового променя, спрямування його на об'єкт вимірювання, проєціювання його у вигляді світлового знака на двокоординатну фотоприймальну матрицю після відбиття його від поверхні об'єкта. Світловому знаку оптичного променя надають подушкоподібну форму з рівномірним розподілом інтенсивності по площі знака. Ширина світлового знака задає максимальний діапазон вимірювання.

Електричний сигнал з фотоприймача розподіляють по двох каналах. В каналах отримані сигнали обробляють і формують сигнали, пропорційні величині зміщення об'єкта від вихідного положення, вимірюють їх і по

порогових значеннях формують команду керування. За часом перебування траєкторії зміщення та її імовірностних характеристик за критичними пороговими значеннями визначається вид динамічної ситуації – допустиме значення відхилення, або випадковий вихід траєкторії зміщення об'єкта за допустиме значення на деякий інтервал часу, або стабільне знаходження траєкторії зміщення за порогом допустимого.

Перевірка гіпотез про динамічну ситуацію здійснюється як по додатному, так і по від'ємному перевищенню порогових значень і при необхідності формується команда на зміну режиму роботи об'єкта.

Приклад використання оптичного випромінювання для моделювання акустичних вібрацій наводиться у патенті України [23]. Модель джерела звукової енергії виконується у вигляді ніхромової нитки, яка при нагріванні розжарюється і освітлює модель міської забудови і засіб оцінки розподіленої енергії. Фотопластина в якості засобу оцінки розподіленої енергії суміщається з основою моделі міської забудови.

Спочатку фотопластинку засвічують у межах моделі досліджуваної забудови, а потім за її межами. Зображення, яке з'являється на фотопластинці після проявлення, візуалізує картину розподілення енергії, що моделюється, по території досліджуваного об'єкта. При цьому інтенсивність звука у певних точках природи пропорційна.

За методом вимірювання вібраційних коливань наявні патенти розділяються на кілька груп.

### **На базі інтерференційного методу.**

Інтерференційний метод вимірювання коливань обертового об'єкта використовується у патенті [25]. Обертний об'єкт опромінюють двома імпульсами когерентного випромінювання з різною просторовою

орієнтацією і записують за допомогою опорних пучків двохпозиційну голограму об'єкта. Після відновлення з неї зображення об'єкта першим опорним пучком, а потім другим опорним пучком, і зміни взаємної орієнтації відновлених зображень одержують інтерференційну картину. Зміну положення обертового об'єкта оцінюють по зміні взаємної орієнтації між першим та другим відновленими зображеннями.

Вимірювання амплітуд вібрації за допомогою інтерференційного методу наведено в патентах [26, 27]. Сутність патентів полягає у формуванні опорного та вимірювального пучків когерентного випромінювання та одержанні поля інтерференції. Потому частоту випромінювання одного з пучків зсувають відносно другого на величину, меншу  $f/2$ ,  $f$  – частота вібрації контрольованого об'єкта, та одержують сигнал, пропорційний яскравості поля інтерференції. При фільтрації сигналу в ньому залишають гармонічні складові, по характеру яких судять про амплітуду вібрації.

Інтерференційний метод дослідження періодичних коливань наведений у патентах [28, 29]. Формуються інтерференційні картини і перетворюються в опорний та відповідний досліджуваному коливанню електричні сигнали. Порівнюючи характеристики одержаних сигналів судять про амплітуду коливань досліджуваного об'єкта. Для формування інтерференційної картини опорного сигналу задають амплітуду вібрації досліджуваного об'єкта, що перевищує  $\lambda/4$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера. Для оцінки опорного та досліджуваного сигналів обирають їх обвідні, знаходять відношення амплітуд обвідних сигналів, по їх співвідношенню визначають характер коливань і по формулам розраховують амплітуди гармонік досліджуваного коливання.

### **На основі геометричного і координаційного методів**

Спосіб визначення форм коливань поверхні, згідно патенту [30], полягає у реєстрації розподілу інтенсивності у відбитому від неї пучка світла. Для цього на досліджувану поверхню відбиття наноситься індикатор у вигляді тонкого дифузно відбиваючого шару, а відбитий пучок світла приймають дискретно по досліджуваній поверхні матрицею фотоприймачів з вузьким полем зору.

До збудження коливань фіксують значення сигналів з кожного елемента матриці фотоприймачів і в момент коливань відтворюють форму коливань поверхні заданої площі, вибір якої здійснюють за рахунок керування спрацюванням матриці електронних ключів, зв'язаної з матрицею фотоприймачів електричним зв'язком. Розв'язання полів зору елементів матриці фотоприймачів здійснюється шляхом оптичного зв'язку її з матрицею бленд.

Діагностична система вимірювання статичних та динамічних деформацій описана у патенті [31]. Оптичний контур системи вміщує лазерний випромінювач, світловідбиваючу плівку та блок оптичних призм з фотодетектором, що забезпечують гетеродинування відбитого випромінювання. Світловідбиваюча плівка з вбудованими елементами сферичної форми, що забезпечує адаптивну діаграму відбиття, наноситься на вібруючу поверхню об'єкта. Лазерний випромінювач, блок призм та світловідбиваюча плівка розміщуються на одній прямій лінії, що дозволяє відстежувати просторовий зсув відбитого випромінювання.

### **На основі частотного методу**

У патенті [32] описаний оборотний безконтактний датчик вимірювання кута розкрутки кожної із лопаток контрольованого колеса і амплітуди крутильної складової коливань. Вимірювання побудовані на відбитті оптичного

випромінювання, що формується у вигляді прямокутних імпульсів, від упорядково-штрихоподібних відбиваючих ділянок на зовнішніх торцях лопаток. Мікроконтролер та ПК з відповідною програмою обробки вимірної інформації дозволяють перетворити частотну складову відбитого випромінювання у характеристику коливань.

### **На основі фазового методу**

Фазовий метод вимірювання вібрацій обертових об'єктів та голографічний пристрій на його основі описані у патенті [33]. Блок вимірювання фази складається із оптично зв'язаних імпульсного лазера з регульованою добротністю, дзеркало якого встановлено на валу об'єкта, та двох фотодіодів, підключених до каналу керування підпалом та каналу керування добротністю.

Кожний канал містить попередній підсилювач, компаратор, диференціальний ланцюг, схему збігу та одновібратор. Виходи одновібраторів з'єднані з входами імпульсного лазера. Записані в оптичній схемі голограми порівнюються та по різниці фаз розраховуються вібраційні характеристики.

Таким чином, основні результати та тенденції розвитку віброметрії є такі.

- Можливості діагностичних систем визначаються вибором сигналу вібрації, який містить достатню інформацію для довгострокового прогнозу стану об'єкта.
- Найефективніші технічні засоби вібродіагностики, як стаціонарні, так і переносні, будуються на базі комп'ютерної техніки і технології.
- Найбільша кількість патентів в галузі оптичної віброметрії видана на інтерференційний метод вимірювання коливань та пристрої на його основі. Складність реалізації цього метода суттєво обмежує області його застосування.

- Більш простими, але менш поширеними, виходячи із кількості патентів, є геометричні та частотні методи віброметрії.
- Патентів з застосуванням фазового методу вимірювання коливань об'єкта є обмаль.

Отже розробка вібродіагностичної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) у складі автономного оптико-локаційного віброметра з високими метрологічними і експлуатаційними характеристиками та керуючого телеметричного пристрою, що забезпечує стільниковий зв'язок з комп'ютером, є важливою задачею.

#### **4.2. Метод дистанційної реєстрації вібраційних коливань та алгоритм роботи оптико-локаційного віброметра**

Застосування оптико-локаційного віброметра (ОЛВ) для дослідження коливних об'єктів передбачає розвиток нових у даній науковій галузі методів і засобів, які дозволять не тільки дистанційно вимірювати локальні вібраційні характеристики, а також без скануючих пристроїв одержувати двокоординатну картину їх розподілу в реальному часі за допомогою організованої за матричною схемою системи вібродатчиків.

Розробка нових методів та пристроїв дистанційної реєстрації вібраційних коливань поверхні об'єктів та їх змін у часі, тобто вібраційних прискорень, дозволяє створення на їх засаді системи автоматичного моніторингу вібрацій коливних об'єктів.

Фахівці, що працюють в різних галузях, стикалися з необхідністю спостережень за зміною геометричних параметрів будівель і споруд протягом тривалого періоду часу, отже потрібні системи просторового моніторингу за деформаціями об'єктів. Завданням такого моніторингу є

визначення планових і висотних зсувів як окремих елементів конструкцій, так об'єктів в цілому.

Важливими є спостереження за будівлями, що мають культурну та історичну цінність, особливо в періоди їх реставрації або масштабних реконструкцій довколишніх територій, пов'язаних з будівництвом нових об'єктів. З розвитком сучасних технологій будівництва великого поширення набули висотні і великопротітні споруди та будівлі, що мають купольні конструкції. Використання систем моніторингу вібрацій в процесі будівництва і експлуатації таких будівель і споруд дозволить відстежувати деформаційні процеси і своєчасно приймати заходи в разі нестандартного розвитку ситуацій.

Необхідно проводити постійний моніторинг стану гребель гідроелектростанцій з метою виявлення їх деформацій при сезонних перепадах рівня води у водосховищах і внаслідок різних геологічних процесів. Таким чином, є велика кількість ситуацій, коли необхідний постійний моніторинг геометричних змін, що відбуваються, на існуючих об'єктах та на тих, що будуються.

Наведені приклади виявляють важливість проведення моніторингу вібрацій. Підвищена вібрація належить до факторів, що найбільш несприятливо впливають на надійність роботи різних пристроїв та об'єктів, знижує їх ресурсні характеристики, погіршує економічні показники використання, наприклад, АЕС. У вібродіагностиці найчастіше застосовується догматичний підхід до аналізу сигналів вібрації, який полягає в розгляді сигналів на основі дискретного перетворення Фур'є. Це не дозволяє повною мірою проаналізувати вібраційний сигнал, визначити технічний стан, наприклад, турбоагрегату, та підвищити показники використання енергоблоку.

Достовірне визначення стану об'єкта за сигналами вібрації, в першу чергу, визначається характеристиками системи вібродіагностики. Робота систем контролю вібрації повинна бути направлена на розвиток вібродіагностики як напряму по виявленню причин та умов підвищеної вібрації і прийняттю обґрунтованих рішень по їх усуненню. Необхідно отримувати достовірні відомості про функціональну безпечність та безвідмовність об'єкта з метою забезпечення успішного функціонування в процесі подальшої експлуатації. Такому напрямку вібродіагностики сприяв бурхливий розвиток мікропроцесорної та комп'ютерної техніки і технологій.

Таким чином, в даний час існує актуальна науково-технічна задача удосконалення систем вимірювання, алгоритмів і пристроїв обробки сигналів вібрації для достовірного визначення стану обладнання, що дозволить ефективно управляти його ресурсом і підвищити ефективність роботи.

В даний час актуальні розробки безконтактних систем просторового моніторингу деформацій об'єктів. Завданням такого моніторингу є визначення вібраційних характеристик і зсувів як окремих елементів конструкцій, так об'єктів в цілому, тобто необхідні спостереження за зміною геометричних параметрів об'єктів протягом тривалого періоду часу.

Роботи, пов'язані з просторовим моніторингом, достатньо коштовні і складні в організації. Вони вимагають використання високоточного устаткування, оскільки величини визначуваних деформацій і амплітуд вібрацій можуть обчислюватися в міліметрах. Для виконання спостережень необхідне залучення значної кількості кваліфікованих фахівців. Вихід з ситуації, що склалася, у використанні автоматичних вимірювальних комплексів, в яких участь людини зведена до мінімуму.



У багатьох випадках реєстрацію коливань елементів конструкцій у важкодоступних але максимально інформативних точках необхідно проводити за допомогою неконтактних датчиків вібрації. Коли відстані до цих характерних точок лежать в діапазоні від одиниць до десятків метрів, доцільні застосування лазерних віброметрів.

Використання коштовних лазерних віброметрів (ціна від 1,5 тис. \$ США), заснованих на ефекті Доплера, в даних випадках не виправдано із-за великого діапазону амплітуд і складної форми вимірюваних коливань, а також неможливості реєстрації останніми постійних зсувів контрольованих елементів конструкцій.

Найбільш перспективними в даній області є лазерні вимірники переміщень і вібрацій, засновані на фазовому методі вимірювань [34].

Фазовий метод вимірювання амплітуди коливань передбачає гармонійну модуляцію по інтенсивності оптичного сигналу з частотою  $F_m$ , що задається високостабільним генератором.

Зміна дальності  $L$ , пов'язана з вібрацією досліджуваної поверхні, супроводжується виникненням фазового зсуву  $\Delta\varphi$  між фазою модулюючого сигналу  $F$  і фазою огинаючої відбитого сигналу.

При даному методі вимірювань вібрації досліджуваної поверхні призводять до фазової модуляції високочастотної огинаючої оптичного сигналу.

Фазовий зсув пов'язаний з дальністю відомим співвідношенням

$$\Delta\varphi = 2\pi F_m L / (2nl / c),$$

де  $n$  – показник заломлення повітря,  
 $c$  – швидкість світла.

У таких пристроях вібрації досліджуваної поверхні приводять до фазової модуляції височастотної обвідної використаного оптичного сигналу.

При частотах модуляції зондуючого оптичного сигналу  $F_M = 100 \dots 200$  МГц точність вимірювання віброзміщення в діапазоні від 1,0 мм до одиниць метрів складає 0,1 мм.

Частотний діапазон лазерних вимірників переміщень і вібрацій, заснованих на фазовому методі вимірювань, при застосуванні оптимальної фільтрації вимірювального сигналу складає 1...1000.

Безконтактний метод вимірювання вібраційних характеристик, заснованого на фазовому методі вимірювання, застосовується в ОЛВ, структурна схема якого наводиться на рисунку 4.1.

Алгоритм роботи ОЛВ наступний. Сигнал з задавального генератора ЗГ, підсилений підсилювачем потужності ПП, модулює струм лазерного випромінювача ЛВ. Модульоване по інтенсивності випромінювання ЛВ за допомогою однолінзового об'єктива спрямовується на коливальну поверхню КП досліджуваного об'єкта. Частина відбитого від КП випромінювання захоплюється приймальним об'єктивом і фокусується на площадці фотоприймача ФП.

Одержаний з ФП електричний сигнал підсилюється резонансним підсилювачем РП, налаштованим на 1-у гармоніку частоти ЗГ.

Опорний сигнал з задавального генератора і вимірювальний сигнал, що пройшов через лінію затримки відкритого оптичного каналу віброметра, за допомогою змішувачів ЗМ1 та ЗМ2 перемножуються з сигналом гетеродина Г і підсилюються по амплітуді ширококутовими підсилювачами ШП1 та ШП2.

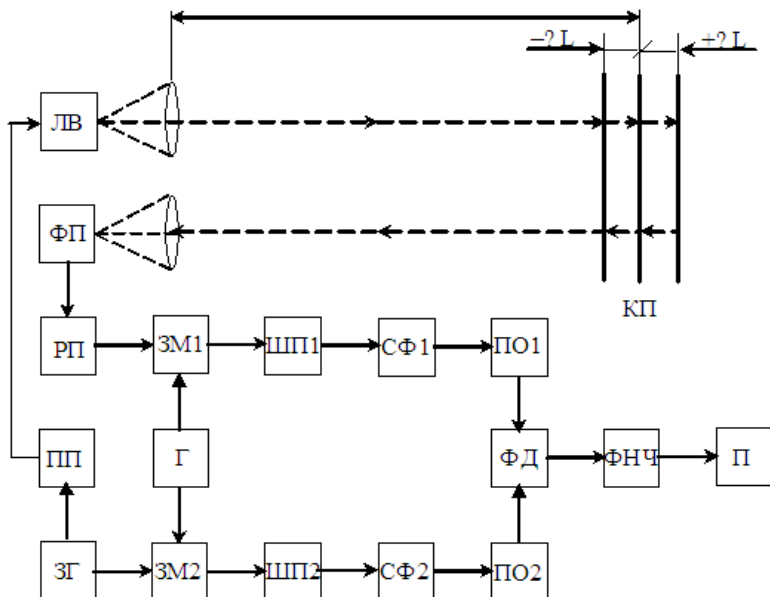


Рисунок 4.1. Структурна схема ОЛВ

- ЛВ – лазерний випромінювач,  
 ФП – фотоприймач,  
 КП – коливна поверхня,  
 РП – резонансний підсилювач,  
 ПП – підсилювач потужності лазерного випромінювача,  
 ЗГ – задавальний генератор,  
 ЗМ1, ЗМ2 – змішувачі,  
 Г – гетеродин,  
 ШП1, ШП2 – широкосмугові підсилювачі,  
 СФ1, СФ2 – смугові фільтри,  
 ПО1, ПО2 – підсилювачі-обмежувачі,  
 ФД – фазовий детектор,  
 ФНЧ – фільтр низької частоти 2-го порядку,  
 П – повторювач.

Різницеві НЧ-сигнали проміжної частоти опорного та вимірювального каналів виділяються за допомогою смугових фільтрів СФ1 та СФ2 і через підсилювачі-

обмежувачі ПО1 та ПО2 надходять на фазовий детектор. З виходу фазового детектора ФД сигнал надходить на фільтр низької частоти ФНЧ 2-го порядку, що має частоту зрізу, рівну 1,0 кГц.

На виході ФНЧ формується НЧ-сигнал, амплітуда якого прямопропорційна віброзсуву, а частота обернено пропорційна часу переміщення коливальної поверхні від положення  $-\Delta L$  до положення  $+\Delta L$ . Повторювач П необхідний для узгодження вихідного опору ФНЧ і навантаження.

ОЛВ, реалізований у відповідності з розробленою структурною схемою, дозволяє вимірювати віброзміщення досліджуваної поверхні в діапазоні від десятих часток міліметра до величини, рівної половині довжини хвилі сигналу модуляції зонduючого лазерного випромінювання, з частотами вібрації в діапазоні 0...1000 Гц. При частоті модуляції  $F_m = 100$  МГц можливо вимірювання віброзміщення  $\pm \Delta L = \pm 0,8$  мм.

Таким чином, отриманим результатом є:

- визначення діапазону віброзміщення та частоти вібрації поверхонь об'єктів для застосування вимірювальної системи;
- при застосуванні частоти модуляції зонduючого лазерного випромінювання  $F_m = 100$  МГц точність вимірювання віброзсуву складає 0,1 мм;
- розробка структурної схеми та алгоритму дії ОЛВ, заснованого на фазовому методі вимірювання віброзміщення та частоти коливань поверхні досліджуваного об'єкта.

### **4.3. Технічні та програмні складові вібродіагностичної системи**

Діагностування стану об'єкта по ступеню небезпеки пошкодження на основі даних контролю вібрації – один з найбільш ефективних методів підвищення його надійності.

Вібраційне діагностування об'єктів проводиться в три етапи: первинний опис вібраційного стану об'єкта, виділення ознак і прийняття рішення. Вибір діагностичних параметрів вібрації залежить від типів досліджуваних об'єктів, амплітудного і частотного діапазону вимірюваних коливань.

У низькочастотному діапазоні частіше вимірюють параметри вібропереміщення, в середньо частотному – віброшвидкості, а у високочастотному – віброприскорення. Вібропереміщення уявляє інтерес у тих випадках, коли необхідно знати відносний зсув об'єкта або деформацію.

Алгоритм аналізу характеристик вібросигналу включає наступне: дискретизацію вібросигналу, цифрову фільтрацію, обчислення інформативних параметрів і визначення технічного стану об'єкта. У загальному випадку вібродіагностичне устаткування підрозділяється на три класи: пристрої контролю, пристрої моніторингу, діагностичні системи.

Система моніторингу вібрацій призначена для забезпечення віддаленого збору вібропараметрів контрольованого об'єкта за допомогою ОЛВ, оснащених телеметричним каналом зв'язку. Вона забезпечує дистанційне зняття показань та управління режимом роботи приладів по радіоканалу стільникового GSM-зв'язку і використовується при розташуванні приладів контролю у важкодоступних місцях.

До складу ІВС входять наступні технічні і програмні компоненти [35]:

- автономні оптико-локаційні лазерні віброметри;
- переносний комп'ютер (notebook) центру збору і обробки даних;
- телеметричний пристрій прийому інформації від ОЛВ;
- програмне забезпечення (ПЗ).

Автономний ОЛВ [35] призначений для реєстрації і вимірювання параметрів коливань елементів конструкцій в максимально інформативних точках спостережуваних об'єктів і передачі вимірних значень по телеметричних каналах (безпроводному каналу зв'язку) на віддалений центр збору і обробки інформації.

Кожний ОЛВ, включений в систему віддаленого збору вібропараметрів контрольованого об'єкта, має в GSM-мережі власну адресу (телефонний номер використовуваної SIM-карти), по якій комп'ютер віддаленого центру збору і обробки інформації його ідентифікує.

Автономний ОЛВ забезпечує виконання наступних функцій:

- вимірювання вібраційних коливань,
- збереження масиву даних за період вимірювання в енергонезалежній пам'яті,
- передача масиву даних і параметрів по безпроводному каналу зв'язку,
- контроль стану батареї живлення.

На комп'ютері центру збору і обробки інформації, що здійснює дистанційне зчитування даних, встановлюється спеціалізоване програмне забезпечення. Телеметричний пристрій (ТП) прийому інформації від ОЛВ підключається до USB-порту переносного комп'ютера і використовується для збору даних від всіх віддалених ЛВ, включених в систему. ТП забезпечує прийом інформації від ОЛВ і передачу йому службових команд.

Характеристики телеметричного пристрою:

- інтерфейс для підключення до комп'ютера – USB,
- радіочастотний діапазон – 900 МГц,
- живлення телеметричного пристрою від інтерфейсу USB,
- потужність передавача – 10 мВт.

Програмне забезпечення повинне володіти наступними функціональними можливостями:

- формування списку ОЛВ з вказівкою адреси, місця;
- установки, параметрів імпульсного сигналу, іншої додаткової інформації,
- автоматичний прийом інформації від ОЛВ, внесених до списку,
- перегляд прийнятої інформації від ОЛВ,
- експорт прийнятої інформації в додаток Microsoft Excel та інші,
- розпізнавання і блокування несанкціонованого доступу, а так само будь-якої іншої побічної інформації.

Алгоритм роботи ІВС наступний.

Через заданий інтервал часу кожен із включених в систему ОЛВ передає пакет даних вібровимірювань, внесений до пам'яті його мікроконтролера, в GSM-адресу комп'ютера центру збору і обробки інформації. Керування режимом вимірювання вібропараметрів кожного конкретного ЛВ, а так само зміна інтервалу часу відсилання пакета даних, проводиться комп'ютером центру збору і обробки інформації шляхом відсилання керівних SMS-повідомлень.

Перед початком роботи виконується первинна настройка ІВС автоматичного дистанційного моніторингу вібрацій. Настройка полягає у виконанні наступних операцій:

- завдання для програми номера порту, до якого підключений телеметричний пристрій прийому інформації від ОЛВ,

- створення списку об'єктів, на яких встановлені ОЛВ,
- записи номерів (адрес) ОЛВ.

Програма в автоматичному режимі здійснює прийом інформації від ОЛВ. При нормальному радіозв'язку між ОЛВ і приймачем інформації через заданий часовий інтервал відбувається оновлення інформації в стовпці «Дата», а, за наявності імпульсів на вході ОЛВ, також в стовпці «Число імп.» головного вікна програми системи. Всі транзакції відображаються в області буфера обміну головного вікна програми.

Для зручності роботи всі об'єкти можуть бути об'єднані в групи за якою-небудь ознакою. Вся прийнята інформація накопичується в базі даних і може бути експортована в додаток MS Excel або Word для формування звітів.

Основне призначення системи – зняття показань з ОЛВ, проте вона застосовується і в інших областях. Контролер, що здійснює зняття показань, виконує це дистанційно, використовуючи мобільний комплект з переносного комп'ютера і приймача інформації.

Об'єкт вібрації часто розташовується у віддаленому, важкодоступному місці, де немає технічної можливості прокладки кабелю або вартість прокладки достатньо висока. Тоді поряд з об'єктом встановлюється ОЛВ, що має автономне живлення, який здійснює передачу інформації з приладу по радіоканалу.

Розроблений інтерфейс є сукупністю засобів і методів взаємодії між елементами системи вібромоніторингу. Інтерфейс – основа взаємодії всіх сучасних інформаційних систем [36]. Якщо інтерфейс будь-якого об'єкту (персонального комп'ютера, програми, функції) не змінюється (стабільний, стандартизований), це дає можливість модифікувати сам об'єкт без перебудови принципів його взаємодії з іншими об'єктами.



Віброаналізуюча апаратура повинна володіти мінімально необхідним набором можливостей, до яких відносяться і деякі технічні характеристики. Визначальним критерієм при цьому є функціональні можливості.

До технічних характеристик відносяться такі параметри, як:

- динамічний діапазон,
- мінімальний рівень вхідного сигналу,
- розрядність і швидкодія АЦП,
- об'єм пристрою, що запам'ятовує,
- лінійність АЧХ, та ін.

Розробка та створення системи вібромоніторингу проведена з використанням засобів MatLab та ZETLab-Studio [37]. Компоненти ZETLab-Studio максимально спрощують процес створення приладів та додатків для вимірювання і обробки сигналів. Програмні та апаратні засоби ZETLab комп'ютерної автоматизації вимірювань, управління і моделювання знаходять велике застосування в наукових дослідженнях, а також в освіті. ZETLab-Studio – інтегроване середовище розробника для створення програм збору, обробки даних і управління периферійними пристроями.

Дане програмне середовище є набором вбудованих компонент для швидкої та ефективної розробки вимірювальних, контрольних та керуючих програм дає можливість для створення високопродуктивних систем обробки сигналів в реальному масштабі часу.

Програмування здійснюється на будь-якій об'єктно-орієнтованій мові програмування MS Visual Basic, MS Visual C++, Borland Delphi, Borland C++ Builder \* з використанням бібліотечних елементів і готових програм ZETLab. Всі віртуальні прилади-програми працюють як в реальному часі, так і в режимі обробки оцифрованих сигналів у вигляді файлів.

Засоби реєстрації та відтворення сигналів дозволять записувати сигнал і обробляти його із застосуванням різних алгоритмів. Це істотно мінімізує час розробки і налагодження закінченої системи.

До складу системи вібромоніторингу і налагоджувального випробувального стенду включено наступний приладовий парк:

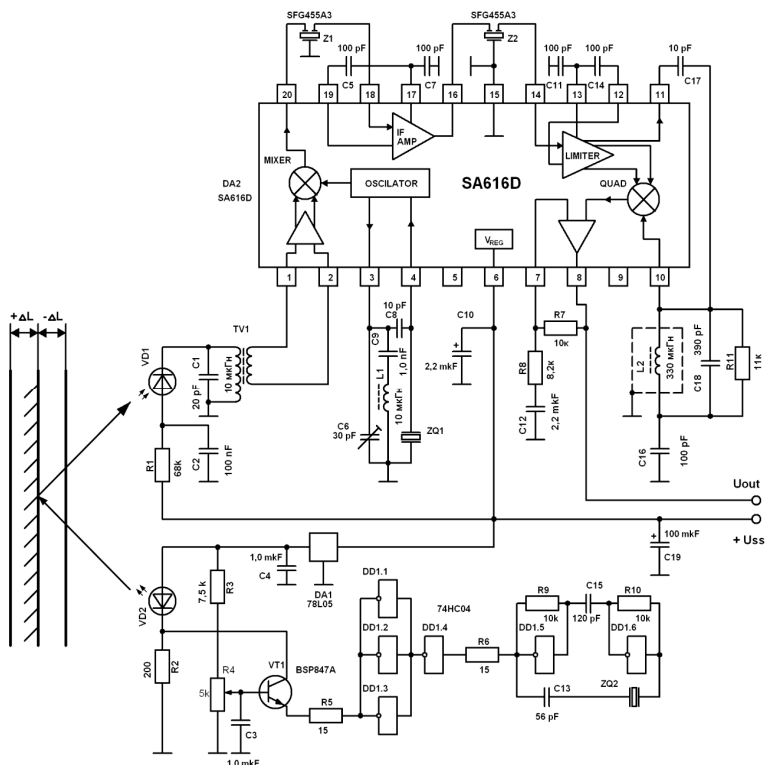
- переносний комп'ютер (notebook),
- віртуальний цифровий Аналізатор/Самопис/осцилограф, наприклад Мтх1052 або Мтх1054 фірми «Chuvin Arnoux»,
- GSM-модем або SIM-300 в кількості 2 шт.

Таким чином, розроблено алгоритм роботи вібродіагностичної ІВС, до складу якої входять:

- автономні оптико-локаційні лазерні віброметри;
- notebook центру збору і обробки даних;
- телеметричний пристрій прийому інформації від ЛВ;
- програмне забезпечення.

Система визначає діапазон віброзміщення та частоти коливань поверхонь об'єктів для ІВС просторового моніторингу деформацій.

Основою ОЛВ є принципова схема, представлена на рисунку 4.2. Схема складається із двох блоків – блока накачки лазерного випромінювача (БНЛВ) і блока реєстрації і обробки вібросигналу (БРОВ), відбитого від коливної поверхні перешкоди. БНЛВ складається із задавального генератора, виконаного на елементах DD1.5, DD1.6, узгоджувального каскаду – елементи DD1.1...DD1.4, транзисторного ключа VT1 і безпосередньо лазерного діода VD2. Частота задавального генератора стабілізується за допомогою кварцового резонатора ZQ2. Для стабілізації амплітуди лазерного випромінювання і виключення паразитних взаємозв'язків по ланцюгах живлення між БНЛВ та БРОВ використовується лінійний стабілізатор DA1.



**Рисунок 4.2.** Принципова схема оптико-локаційного вібрметра

БРОВ складається із рiн-фотодіода VD1, вхідного резонансного контуру TV1, C1, комбінованої мікросхеми DA2 з зовнішніми елементами, до складу якої входять підсилювач ВЧ, перемножувач MIXER, опорний генератор OSCILATOR, підсилювач проміжної частоти IF AMP, підсилювач-обмежувач LIMITER, квадратурний фазовий детектор QUAD і вихідний масштабуючий підсилювач.

Вимірювання параметрів коливання досліджуваної віброуючої поверхні проводиться шляхом аналізу фазових співвідношень між зондуєчим сигналом лазерного випромінювача і сигналом, відбитим від коливної

поверхні. Амплітуда переміщення коливної поверхні прямопропорційна величині зміни різниці фаз між випроміненим і відбитим сигналами, а по швидкості зміни різниці фаз можливо судити про частоту і форму коливань.

Алгоритм роботи схеми ОЛВ наступний.

ВЧ- сигнал із задавального кварцового генератора через узгоджувальний каскад та ключовий транзистор VT1 формує струм накачки випромінювача VD2. Модульований з частотою задавального кварцового генератора оптичний сигнал лазерного світлодіода за допомогою об'єктива спрямовується на віброуючу поверхню. Частина відбитого оптичного сигналу збирається за допомогою приймального об'єктива і фокусується на фоточутливій площині рpn-фотодіода VD1.

Сформований оптичним сигналом із заданою частотою фотострум діода VD1 виділяється вхідним паралельним контуром VT1, C1 і за допомогою узгоджувальної вторинної обмотки передається на вхід симетричного підсилювального каскаду мікросхеми DA2. З виходу підсилювача сигнал надходить на перемножувач MIXE, на який подається сигнал з опорного генератора OSCILATOR, частота генерації котрого задається кварцовим резонатором ZQ1.

Резонансні частоти кварцових резонаторів ZQ1 опорного генератора, мікросхеми DA2 і ZQ2 задавального генератора БНЛВ відрізняються один від одного на величину 455 кГц, що є стандартною проміжною частотою приймальних ЧМ-трактів. З виходу перемножувача НЧ-складова (455 кГц) відокремлюється за допомогою кварцового фільтра Z1 від ВЧ-складових і подається на вхід підсилювача проміжної частоти IF AMP. З виходу підсилювача проміжної частоти підсилений по амплітуді сигнал через аналогічний кварцовий фільтр Z2 надходить на підсилювач-обмежувач LIMITER. З виходу

підсилювача-обмежувача сигнал подається на вхід квадратурного детектора QUAD. На другий вхід квадратурного детектора подається той самий сигнал, але з фазовим зсувом  $90^\circ$ , котрий формується за допомогою зовнішнього фазозсуваючого ланцюга, виконаного на елементах C17, L2, C18, R11, C16.

Таким чином, на вході квадратурного детектора формується напруга, величина котрої прямопропорційна зміні різниці фаз, викликані вібрацією досліджуваної поверхні.

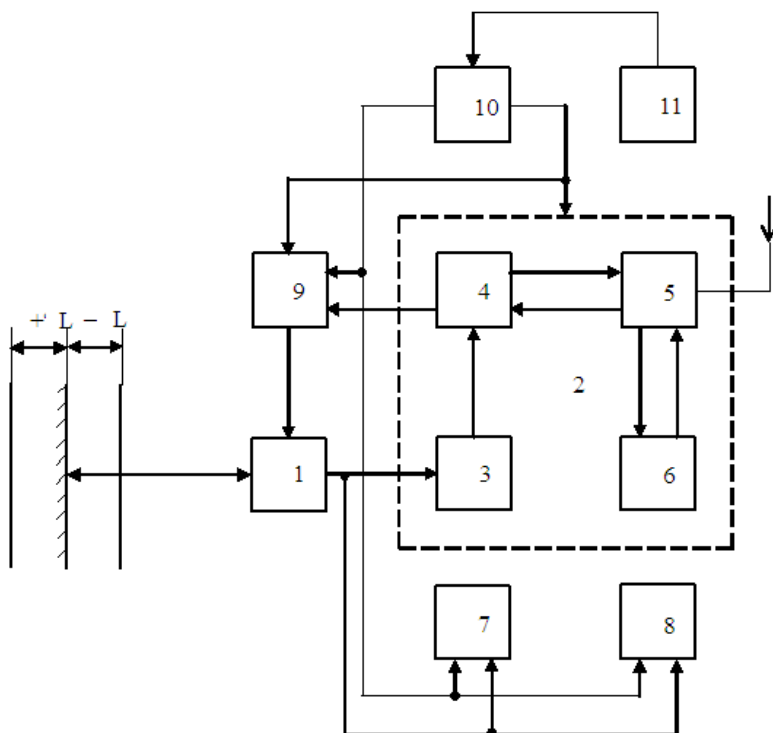
З виходу квадратурного детектора сигнал надходить на вхід масштабуючого підсилювача. За допомогою підбору номіналів зовнішніх елементів R7, R8, C12 коефіцієнт передачі масштабуючого підсилювача встановлюються таким, щоб динамічний діапазон амплітуд вихідного сигналу віброметра відповідав динамічному діапазону зміни амплітуди коливань віброуючої поверхні досліджуваного об'єкта.

Структурна схема системи дистанційних вібровимірювань, показана на рисунку 4.3., об'єднує функції пристроїв, вузлів та блоків, що входять до неї, в єдиний алгоритм їх паралельно-послідовної взаємодії для проведення вимірювань параметрів вібрації поверхні об'єкта.

До складу системи входять:

- оптико-локаційний віброметр (ОЛВ) 1,
- керуючий GSM-телеметричний пристрій 2, що складається із аналого-цифрового перетворювача 3, мікроконтролера 4, GSM-модема 5, SIM-карти ,
- блок вимірювання і цифрової індикації величини віброзсуву досліджуваної поверхні 7,
- блок вимірювання і цифрової індикації частоти коливань досліджуваної поверхні 8,
- вузол підключення живлення ОЛВ 9,

- перемикач режиму роботи системи “Ручне вимірювання – Телевимірювання” 10,
- мережний блок живлення 11.



**Рисунок 4.3. Структурна схема системи дистанційних вібровимірювань**

Система розрахована на роботу у двох режимах вимірювання вібропараметрів поверхні об'єкта:

1. Режим ручних вимірювань, при котрому необхідно проводити багато вимірів, переміщуючи поле зору ОЛВ від точки до точки на поверхні об'єкта.

2. Режим телевимірювання вібропараметрів фіксованої точки поверхні об'єкта, що здійснюється із віддаленого центру управління за допомогою GSM-телефонної мережі.

Система розрахована на роботу у двох режимах вимірювання вібропараметрів поверхні об'єкта:

1. Режим ручних вимірювань, при котрому необхідно проводити багато вимірів, переміщуючи поле зору ОЛВ від точки до точки на поверхні об'єкта.

2. Режим телевимірювання вібропараметрів фіксованої точки поверхні об'єкта, що здійснюється із центру управління за допомогою GSM-телефонної мережі.

При виборі режиму «Ручне вимірювання» за допомогою перемикача режимів 10 і вузла підключення живлення 9 напруга живлення з мережного блоку живлення 11 подається на віброметр 1 і блоки вимірювання величини віброзсуву 7 та частоти коливань досліджуваної поверхні 8. При виборі режиму «Телевимірювання» живлення аналогічно подається на ОЛВ і керуючий GSM-телеметричний пристрій. Алгоритм функціонування ІВС в обох режимах наступний:

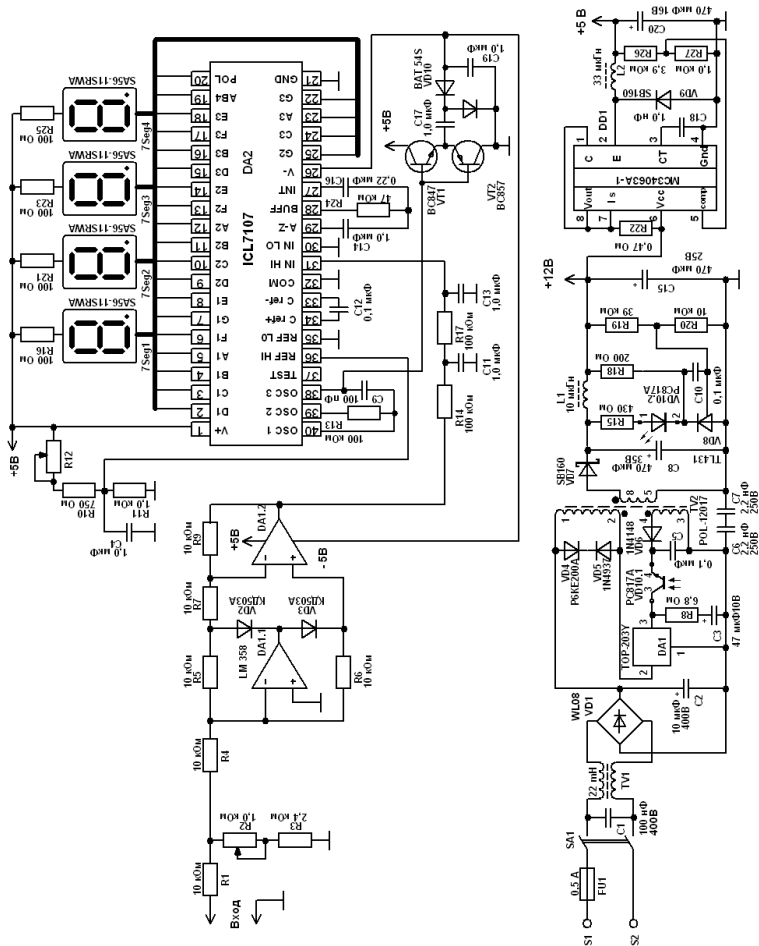
1. В режимі ручного вимірювання аналоговий сигнал з виходу ОЛВ, що змінюється за амплітудою у часі пропорційно коливанням досліджуваної поверхні, надходить на входи блоків вимірювання величини кожного із шуканих вібропараметрів. Частота вібрації досліджуваної поверхні вимірюється у блоці 8. Для вимірювання амплітуди коливань проводиться початкова калібровка блока 7. Для цього за допомогою мікрометричного пристрою вимірюється амплітуда переміщення відбиваючої поверхні вібростенда і електричним резистивним вхідним подільником на цифровому індикаторі блока вимірювання віброзсуву 8 встановлюється числове значення вимірюваної амплітуди.

2. В режимі телевимірювань параметрів коливань досліджуваної поверхні задіяні блоки системи знаходяться в стані очікування, тобто керуючий GSM-пристрій не проводить ніяких дій і напруга на ОЛВ через вузол підключення живлення 9 не надходить.

При прийнятті за допомогою GSM-модему 5 кодованої SMS-команди на проведення вимірювань мікроконтролер 4 у відповідності з внутрішньою програмою за допомогою вузла 9 підключає живлення на ОЛВ і за допомогою зовнішнього АЦП 3 проводить вимірювання поточних значень віброзсуву і частоти коливання досліджуваної поверхні. Одержані результати у вигляді SMS-повідомлення відправляються в адресу абонента GSM-мережі, що надіслав правильну SMS-команду на проведення вимірювань. Також, як і в режимі ручного вимірювання, в режимі телевимірювань проводиться початкова калібровка керуючого GSM-пристрою. За допомогою програмних налаштувань встановлюється відповідність числового значення даних, що відсилаються, і вимірних за допомогою мікрометричної установки по всьому діапазону вимірювань.

На рисунку 4.4 наведена принципова схема блока вимірювання і цифрової індикації величини віброзсуву досліджуваної поверхні. Блок складається із вхідного каліброваного подільника R1...R3, точного випрямляча, виконаного на основі мікросхеми DA1, НЧ-фільтра виділення постійної складової сигналу R14, R17, C11, C13, АЦП – DA2 і цифрового світлодіодного індикатора 7Seg1...7Seg4. Аналоговий сигнал з виходу ОЛВ через вхідний подільник, точний детектор і НЧ-фільтр надходить на вхід АЦП, де проводиться його перетворення у двійково-десяткову форму, і одержане значення відображається на цифровому індикаторі.





**Рисунок 4.4. Принципова схема блока вимірювання та цифрової індикації величини віброзсуву поверхні**

На рисунку 4.4 також представлений мережний блок живлення, що формує потрібні величини напруги для живлення всієї вібровимірювальної системи.

На рисунку 4.5 наведена принципова схема блока вимірювання і цифрової індикації частоти коливань досліджуваної поверхні.

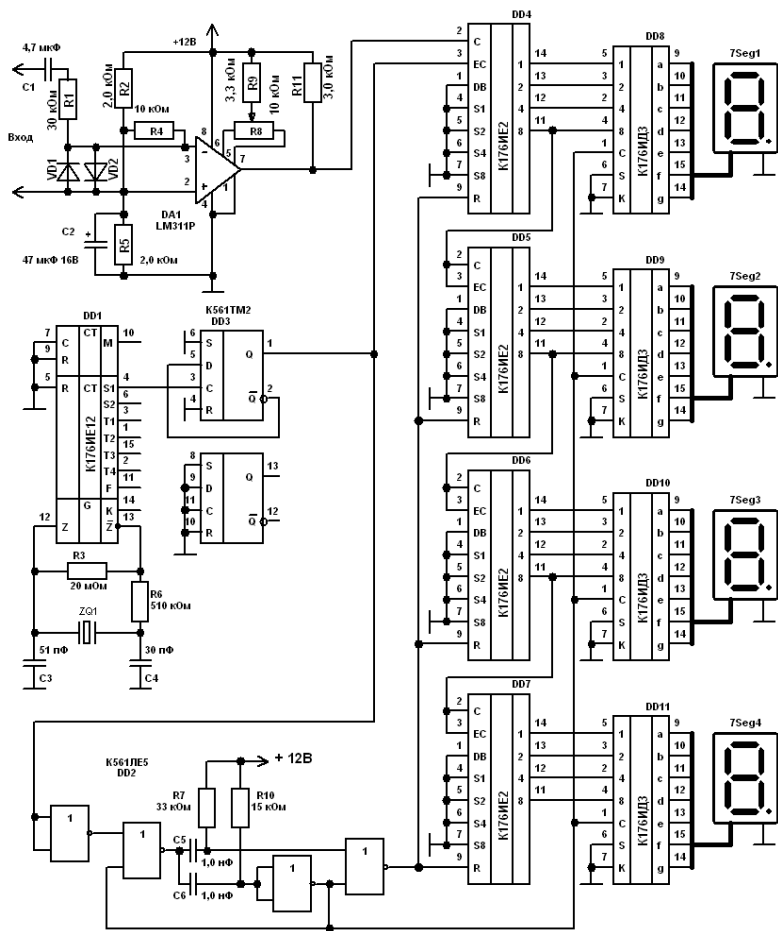


Рисунок 4.5. Принципова схема блока вимірювання та цифрової індикації частоти коливань поверхні

До складу блока входять:

- вхідний підсилювач-обмежувач, виконаний на основі компаратора DA1,
- формувач секундного вимірювального інтервалу – елементи DD1, DD3, ZQ1,
- 4 двійково-десятькового лічильника DD4...DD7,
- 4 дешифратора DD8...DD11,
- вузол запису показань лічильників в пам'ять дешифраторів, виконаний на основі елемента DD2,
- 4 цифрових семисегментних світлодіодних індикаторів 7Seg1...7Seg4.

Сигнал змінної амплітуди з виходу ОЛВ надходить на вхід підсилювача-обмежувача. З виходу підсилювача-обмежувача сигнал прямокутної форми, сформований у вигляді меандру, надходить на вхід послідовно з'єднаних двійково-десятькових лічильників. На другий вхід лічильників надходить імпульс негативної полярності тривалістю 1 с.

У перебігу секундного вимірювального інтервалу проводиться підрахунок кількості вхідних імпульсів сигналу ОЛВ.

У момент закінчення вимірювального секундного інтервалу підраховане число імпульсів із лічильників за допомогою одиничного імпульсу позитивної полярності, який формується у вузлі запису, переноситься у пам'ять дешифратора та індидується за допомогою семисегментних світлодіодних індикаторів.

По закінченні імпульсу запису з другого виходу вузла запису проводиться обнуління показань лічильників. Дана процедура повторюється циклічно з інтервалом у 2 с.

Згідно з алгоритмом проведення вібровимірювань розробляється схемо-технічне рішення керуючого GSM-телеметричного пристрою, принципова схема якого наведена на рисунку 4.6.

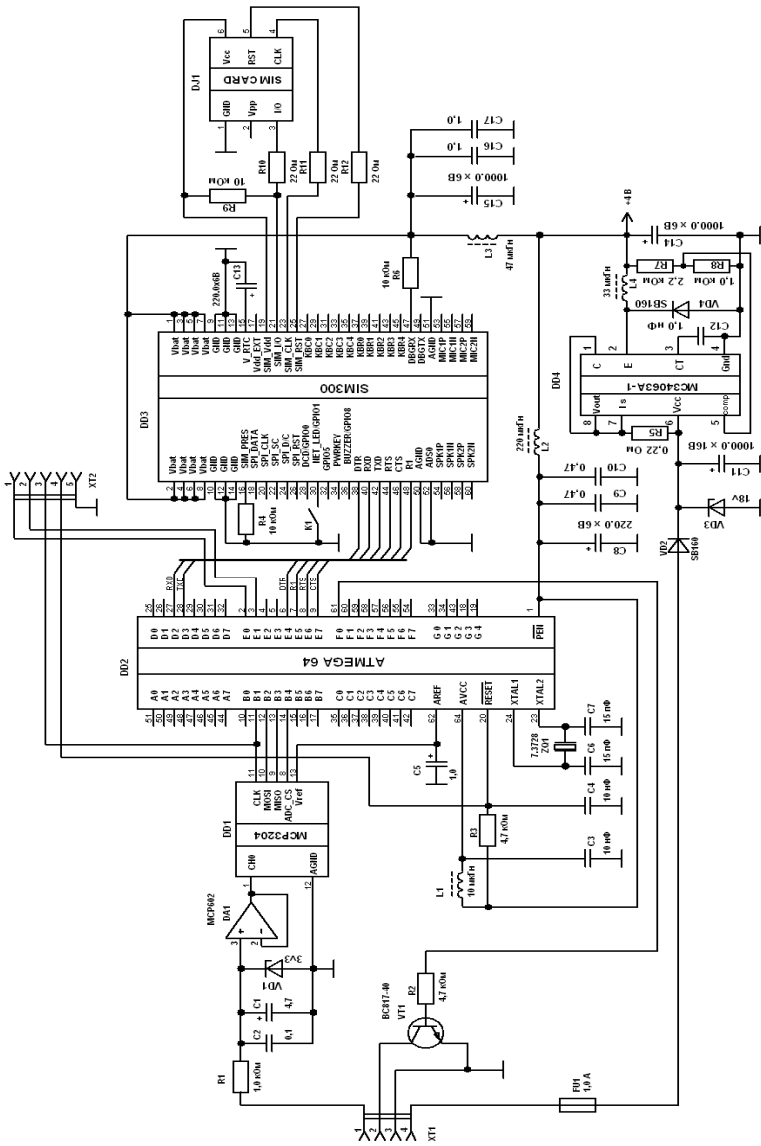


Рисунок 4.6. Принципова схема GSM-телеметричного пристрою

До складу схеми входять:

- мікроконтролер DD2;
- аналогово-цифровий перетворювач DD1;
- узгоджувачий вхідний підсилювач PA1 з вхідним фільтром на елементах R1, C1, C2, VD1;
- GSM-модем DD3 з тримачем SIM-карти DJ1;
- стабілізатор живлення, на засаді імпульсного перетворювача DD4;
- транзисторний ключ VT1.

GSM-модем призначено для доступу контролера в мережу стільникового зв'язку.

Вимірювання параметрів вібрації об'єкта проводиться дистанційно, за допомогою підсвічування контрольованої поверхні променем лазера з наступною реєстрацією відбитого випромінювання, аналізом отриманого сигналу фотовідповіді, обчисленням величин амплітуди і частоти коливального процесу.

Оптимальним каналом взаємообміну даними між автономним ОЛВ і комп'ютером системи збору даних, з точки зору мінімальної вартості і доступності апаратури зв'язку, існуючих методів передачі даних, наявності розгалуженої мережі ретрансляторів, є стільниковий радіозв'язок.

Крім забезпечення взаємообміну даними за допомогою стільникового радіозв'язку між ОЛВ та віддаленою системою збору даних керуючий GSM- телеметричний пристрій вирішує ряд наступних задач:

1. Керує режимом роботи ОЛВ.
2. Вимірює величину віброзміщення і частоту коливань поверхні контрольованого об'єкта.
3. Здійснює запис, зберігання та необхідну попередню обробку даних, що надходять.

Ідентифікація контролера в GSM-мережі, а також доступ до сервісу, що надає оператор стільникового

зв'язку, здійснюється за допомогою SIM-карти, яка з'єднана з GSM-модемом.

Дискретні виходи, що керуються за допомогою SMS-повідомлення чи внутрішньої програми, дозволяють керувати зовнішніми пристроями, тобто лазерним віброметром.

Пакет програм мікроконтролера дозволяє проводити вимірювання і зберігання поточних значень вібропараметрів поверхні контрольованого об'єкта, здійснює передачу даних в режимі on-line або у вигляді пакетів попередньо обробленої інформації, приймає керуючі команди системи збору даних.

Записані дані захищені від зовнішнього впливу, магнітних і електричних полів, вібрації. Тривалість зберігання даних необмежена. В штатному режимі роботи фальсифікація даних неможлива.

До телеметричного приладу приєднано зовнішній пристрій – датчик вібрації. У пристрої передбачено безперервний контроль справності віброметра, а також програмний фільтр, що виключає випадкові спрацювання. Пристрій забезпечує необхідну швидкодію (0,07 с) для контролю параметрів вібропереміщень, крім того, він має необхідні компоненти, що захищають його від впливу радіозавад.

Телеметричний пристрій призначено для здійснення автоматичного оповіщення шляхом автодозвонів та відправки SMS-повідомлень засобами GSM-зв'язку для систем моніторингу стану коливних об'єктів.

Переваги розробленого вимірювального каналу використовуються для контролю різних коливних об'єктів та створення вимірювальних систем, призначених для автоматичного дистанційного моніторингу вібраційних характеристик об'єктів, віддаленого контролю, керування та оповіщення про стан контрольованого об'єкту за

допомогою мобільного телефону чи комп'ютера, використовуючи мережу стільникового зв'язку.

Таким чином, результатом досліджень є:

- Синтез вимірювальних систем для автоматичного дистанційного моніторингу вібраційних характеристик об'єктів.
- Схема керуючого телеметричного пристрою, що забезпечує стільниковий зв'язок з комп'ютером.

#### **4.4. Практичне використання ОЛВ**

Забезпечення безаварійної експлуатації будівель, безвідмовної роботи різноманітних конструкцій та інженерних споруд, а також екологічно небезпечних об'єктів є важливішою проблемою нашого часу.

Розроблена ІВС відрізняється високою швидкістю обробки вимірювальної інформації та дистанційним способом її одержання, дозволяє оперативно, в автоматичному режимі отримувати повідомлення про стан об'єкта, забезпечує облік контрольованих параметрів.

Здебільшого вимірювання вібрацій проводяться методом механічного контакту датчика з джерелом вібрації. Контактні вібродатчики забезпечують високу точність вимірювань в діапазоні низьких частот та відносно великих амплітуд вібрацій.

За межами цього діапазону застосування контактних вібродатчиків неможливе через властиву їм інерційності, а також спотворення характеристик вимірюваних вібрацій.

Для виключення навантаження поверхні об'єкта контактними вібродатчиками з метою усунення впливу на досліджуваний об'єкт необхідні неконтактні методи та засоби вібраційного контролю, не пов'язані з об'єктом

механічним зв'язком. Виходячи з цих аргументів, створення оптико-локаційних пристроїв у віброметрії є актуальним і перспективним.

Найбільша точність та практично необмежений частотний діапазон властиві оптичним вібродатчикам. Фірма Polytec (Німеччина) розробила лазерні віброметри, засновані на реєстрації ефекту Доплера, що здатні вимірювати віброшвидкість від 20 до 100 мм/с, але вони працюють в обмеженому частотному діапазоні від 0,2 Гц до 25 кГц.

Кращий за існуючі у світі аналоги ОЛВ використовує фазовий оптико-локаційний метод вимірювання, який раніше не використовували у даній науковій галузі.

ОЛВ здатний зсунути ВЧ-межу у мегагерцову зону, а вимірювану амплітуду коливань – до одиниць міліметра. ОЛВ використовує новітні технології цифрової реєстрації і обробки сигналу. Його переваги: висока і стабільна точність, лінійність і якісна амплітудно-частотна характеристика.

ІВС автоматичного дистанційного моніторингу є експериментальним вимірювальним комплексом, що складається з ОЛВ, пристрою управління віброметрами, а також блоку спряження з комп'ютером.

Основними функціями системи є отримання та збір даних про вібрації, що відбуваються на спостережуваному об'єкті, і аналіз отриманої інформації. Система також інформує користувачів про наявність недопустимих відхилень як відносно деякої заданої величини, так і таких, що відбуваються за будь-який проміжок часу, тобто при недопустимо швидких змінах положення об'єкта.

Програмне забезпечення отримує дані вимірів від датчиків вібрації, лазерних далекомірів, які підключені до комп'ютера.



При зборі даних використовуються автоматизовані датчики, участь людини при зборі даних виключено. Інформація про виміряні величини записується в спеціальну базу даних. Аналізувати можна як весь зібраний масив даних, так і окремі його фрагменти за заданий інтервал часу. Такий аналіз дозволяє прогнозувати, що чекає спостережуваний об'єкт як в найближчому майбутньому, так і в тривалішій перспективі.

Система дає можливість проводити моніторинг з використанням GPS-устаткування.

Під час збору даних система заздалегідь попереджає користувача про недопустимі зсуви контрольних точок або зміни інших спостережуваних величин. При цьому оператор системи повідомляється як по електронній пошті, так і за допомогою SMS-повідомлення. Таким чином, не потрібно постійно знаходитися біля комп'ютера і контролювати стан об'єкта.

ІВС відрізняється тим, що дозволяє одержувати інформацію про стан коливного об'єкту в найкоротші терміни, навіть в режимі on-line, та в зручній для сприйняття формі.

Метод вібродіагностичного моніторингу заснований на контролі вібропараметрів, що змінюються, об'єктів та устаткування і порівняння їх з вибраними критеріями. Метод дозволяє відслідковувати зміну вібропараметрів, виявляти передумови такого спонтанного процесу, як втрата стійкості, та прогнозувати граничний стан конструктивних елементів, що значно підвищить надійність та достовірність прогнозування граничного стану конструкції з метою запобігання зруйнування та виникнення катастрофічних ситуацій.

Науково-практичне значення результатів розробки ОЛВ в результаті його впровадження сприяє вирішенню

проблеми дистанційної діагностики і прогнозування технічного стану об'єктів по зміні вібраційних характеристик, що забезпечить їх безпеку та надійну експлуатацію.

Практична цінність ІВС полягає у створенні системи контролю безпеки для об'єктів з вібраційними ризиками деформації конструкції.

Розроблена ІВС автоматичного моніторингу вібрацій коливних об'єктів надасть можливість отримання надійної інформації про стан об'єкта на великій відстані від нього, що є надійним засобом попередження та захисту від техногенних аварій.

Економічний ефект від використання ІВС буде досягнуто за рахунок:

- забезпечення їх надійної експлуатації, що дозволить виключити аварії промислових об'єктів, будинків та споруд;
- раціонального використання обладнання, зниження тяжкості аварійних режимів на промислових підприємствах та попередження катастрофічних наслідків руйнування обладнання та споруд;
- прогнозування розвитку аварійної ситуації, розробки стратегії усунення небажаних станів об'єкта та виникнення небезпечних ситуацій.

Соціальний ефект досягається за рахунок можливості попереднього оповіщення людей про загрозу руйнування будов, що виключить людські жертви при техногенних катастрофах.

## Основні результати і висновки до розділу 4

Нові високоточні дистанційні оптико-електронні методи вимірювання амплітуди та частоти коливань об'єкта, аналізу характеристик та параметрів вібрації його поверхні на основі застосування оптичних фазових датчиків вібрацій та новітніх телекомунікаційних технологій обробки інформації дозволяють визначити безпечні межі вібрації обладнання та коливних об'єктів в цілому. Керуючий телеметричний пристрій та інтерфейс зв'язку ОЛВ з центром збору та обробки даних дозволяє отримувати повідомлення про технічний стан об'єкта.

Автоматична вібродіагностична інформаційно-вимірювальна система у складі автономних телекерованих оптико-локаційних віброметров, керуючого телеметричного пристрою та інтерфейсу зв'язку ОЛВ з центром збору та обробки даних проводить обробку оперативних даних вібраційних характеристик коливних об'єктів та їх інформаційне забезпечення.

Економічний ефект від впровадження ОЛВ полягає у можливості прогнозування виникнення екологічно небезпечних і катастрофічних ситуацій, що вирішує проблеми запобігання непередбаченого руйнування і дозволяє уникнути значних матеріальних втрат.

Соціальний ефект досягається за рахунок забезпечення безпеки праці та попереднього оповіщення людей системою ОЛВ про можливість руйнування споруд, будов та обладнання, що виключить людські жертви при техногенних катастрофах.

Впровадження системи моніторингу вібрацій необхідно у таких галузях як авіакосмічна, гідро-, тепло- та ядерна енергетика, нафтогазова і нафтохімічна, автомобільна, суднобудівна і металургійна промисловості, а також у будівництві.

#### Список використаних джерел до розділу 4

1. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерения вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
2. ГОСТ ИСО 5347-0-95. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 0. Общие положения. К.: Госстандарт Украины, 1997. – 29 с.
3. ГОСТ 30652-99 (ИСО 5347-3-93). Вибрация. Калибровка датчиков вибрации и удара. Часть 3. Вторичная вибрационная калибровка методом сличения. К.: Госстандарт Украины, 2001. – 6 с.
4. Основы измерения вибрации. Материалы фирмы DLI (под ред. Смирнова В. А.); <http://www.vibration.ru/literatura.shtml>
5. А. В. Барков, Н. А. Баркова, П. П. Якобсон Современное состояние технических средств анализа вибрации, <http://www.vibration.ru/literatura.shtml>
6. By Glenn D. White, DLI Engineering Corporation Основы анализа данных и поиска неисправностей. Пер. с англ. И. Р. Шейняк под ред. В. А. Смирнова, Л.: Машиностроение, 2002.
7. Гордеев Б. А., Новожилов М. В., Образцов Д. И. Применение ультразвукового метода в вибродиагностике легковых автомобилей // Метрология. – 1990. – № 6. – С. 33 – 36.
8. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов – М.: Энергоиздат. – 1989. – С. 124–162.
9. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Постельга А. Э. СВЧ-автодинный измеритель параметров вибраций // Приборы и техника эксперимента. – 2004 – № 5. – С. 130–134.
10. <http://assom.donntu.edu.ua/remis/index.html>

11. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В., Постельга А. Э., Камышанский А. С. СВЧ и оптические полупроводниковые измерители параметров перемещений и вибраций. / Физика и технические приложения волновых процессов: Тез. докл. III Междунар. н.-техн. конф.: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под. ред. В. А. Неганова, Г. П. Ярового, 6–12 сентября 2004 г., Волгоград: НП ИДП «Авторское перо», С. 72-81.
12. Коломойцев Ф. Н., Быстряков Н. П., Снежко Е. М., Налча Г. И., Харагай А. С. СВЧ установка для измерения вибраций // Измерительная техника. 1971. N11. – С. 45–46.
13. Альтшулер Ю. Г., Сосунов В. А., Усов Н. В. Измерение малых амплитуд механических перемещений с применением открытого СВЧ резонатора // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 1975. – Т. 18. N 10. – С. 93–98.
14. Зак Е. Когерентные световые методы измерения параметров механических колебаний // Зарубежная радиоэлектроника. 1975. N12. – С. 70–76.
15. Лазерные виброметры. Московский технический центр Брюль & Кьер, [www.bksv.com](http://www.bksv.com).
16. Соколов Д. В., ЗАО "Промсервис". Сравнительные характеристики спектроанализаторов. [www.bksv.com](http://www.bksv.com).
17. Сидоров В. А., Сотников А. Л. Сравнительные характеристики спектроанализаторов. Ассоциация механиков "АссоМ", Донецк, Украина, "Мир техники и технологий". 2004. – № 7.
18. <http://www.ukrpatent.org/cgi-bin/searchPat>
19. Патент України № 9184 G 01 Н 9/00, публ. 15.09.2005 Спосіб визначення лінії рівних амплітуд коливаль.
20. Патент України № 64319 G 01 Н 9/00, публ. 16.02.2004 Спосіб вимірювання амплітуди коливаль об'єкта, який обертається, та пристрій для його здійснення.

21. Патент України № 68904 G 01 H 9/00, публ. 16.08.2004 Пристрій для вимірювання амплітуди малих лінійних переміщень.
22. Патент України № 30843 G 01 H 9/00, публ. 15.11.2002 Спосіб вимірювання віброзміщень та пристрій для його реалізації.
23. Патент України № 20369 A G 01 H 9/00, публ. 27.02.98 Пристрій для візуалізації картини зашумованості міської забудови.
24. <http://www.fips.ru/russite>
25. Патент РФ №1568678 G 01 H 9/00, публ. 2005.09.10 Спосіб получения інтерферограми вращающегося объекта.
26. Патент РФ № 2217707 G 01 H 9/00, публ. 2003.11.27 Спосіб измерения амплитуд вибрации.
27. Патент РФ №99113929 G 01 H 9/00, публ. 2001.08.10 Спосіб измерения амплитуд вибрации.
28. Патент РФ №2098776 G 01 H 9/00, публ. 1997.12.10 Спосіб исследования периодических колебаний.
29. Патент РФ № 95115084 G 01 H 9/00, публ. 1997.09.10 Спосіб исследования периодических колебаний.
30. Патент РФ №2007104516 G 01 H 9/00, публ. 2008.08.10 Спосіб определения форм колебаний поверхности и устройство для его осуществления.
31. Патент РФ №2228518 G 01 H 9/00, публ. 2004.05.10 Диагностическая измерительная система.
32. Патент РФ №2337330 G 01 H 9/00, публ. 2008.10.27 Спосіб измерения раскрутки и амплитуды крутильной составляющей колебаний лопаток турбомашин и устройство для его осуществления.
33. Патент РФ №1394879 G 01 H 9/00, публ. 2005.09.10 Голографическое устройство для измерения вибраций вращающихся объектов.

34. Патент України на корисну модель № 21631 G01C 3/08, заяв. № у 200611395, пріор. 30.10.2006, публ. 15.03.2007, Бюл. № 3. “Фазовий оптико-електронний далекомір”. Сантоній В. І., Янко В. В., Іванченко І. О., Будіянська Л. М.
35. В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська, В. А. Сминтина. Автоматична інформаційно-вимірювальна система дистанційного вібромоніторингу // Сборник Материалов 5-й международной научно-практической конференции «Мониторинг окружающей природной среды: научно-методическое, нормативное, техническое, программное обеспечение», 20–24 сентября 2010 г., АР Крым, г. Коктебель, С. 76–77.
36. В. І. Сантоній, Л. М. Будіянська, В. А. Сминтина Синтез системи віддаленого контролю вібрацій коливних об’єктів // Збірн. наук. статей Міжнар. н.-практ. конф. “Екологічні проблеми Чорного моря”, 29–30 жовтня 2009 р. Одеса, С. 77–79.
37. Молчанюк В. И., Будиянская Л. М. Моделирование погрешности измерения дистанции в системе MatLab для фазовых оптико-локационных датчиков // Труды XI Междунар. наук.-практ. конф. «Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2010)», 24–28 мая 2010 г., Одесса. – С. 225.

## **5. МУЛЬТИПАРАМЕТРИЧНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СЕНСОР МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Сучасний рівень складності завдань, що вирішуються за допомогою інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища постійно зростає, тому розробка безконтактних сенсорів нового покоління, які функціонують в умовах впливу дестабілізуючих зовнішніх чинників є актуальною і перспективною. Проведення автоматичного моніторингу навколишнього середовища обумовлює необхідність створення інтелектуального мультипараметричного лазерного сенсора, який відрізняється від відомих здатністю одночасного контролю декількох параметрів повітряного басейну в режимі безперервного спостереження.

Інтелектуальний сенсор, здатний до обліку зовнішніх впливів, вилучення з них корисної інформації і раціональної зміни режимів роботи та його синтез з комп'ютерним центром управління забезпечить дистанційний контроль стану навколишнього природного середовища.

Сенсор являє собою оптико-електронний лазерний пристрій, заснований на об'єднанні чутливих елементів, схем перетворення сигналів і засобів мікропроцесорної техніки, який має здатність автоматичної адаптації до джерела сигналу і навколишнього середовища. Завдяки можливостям самоналагоджування датчик вибирає діапазон вимірювання і надсилає відповідну інформацію в центральну систему управління. У разі виходу за межі діапазону вимірювань подається аварійний або попереджувальний сигнал, що дозволяє своєчасно приймати заходи в разі нестандартного розвитку ситуацій.



## 5.1. Мультисенсорні інформативні системи

Основний підхід для розробки мультипараметричного сенсора (МПС) полягає у тому, що дестабілізуючі зовнішні чинники використовуються для керування характеристиками розробленого інтелектуального сенсора та розпізнавання оптичних сигналів в умовах нестаціонарних завад.

Ідея розробки МПС полягає в створенні інтелектуального адаптивного сенсора, працюючого в умовах нестаціонарних завад та застосуванні сучасних інформаційних технологій, що передбачає перехід від аналогового до цифрового представлення корисного сигналу [1]. Робоча гіпотеза МПС полягає в кореляції між параметрами зовнішніх чинників та адаптивним алгоритмом роботи сенсора, що дозволяє створювати інтелектуальні сенсори із заданими характеристиками.

Використання динаміки оптико-геометричних співвідношень для фотометричних вимірювань удосконалює вимірювальний процес за параметрами точності та спрощує вимірювальну апаратуру. Об'єднання в єдиній структурі багатоканального далекомірного та фотометричного сенсорів з оптико-електронним принципом дії є продуктивним, оскільки існує можливість їх об'єднання.

Проблему створення автоматичних систем моніторингу не можна вирішити ні традиційними хіміко-аналітичними методами (тривалий час аналізу), ні з допомогою дорогих хромато-маспектрометрів (коштовне і громіздке обладнання). Існуючі аналітичні прилади з «жорсткою» структурою побудови мають великі габаритні розміри, складну схемну реалізацію, вузьку спеціалізацію, що робить їх малоефективними при проведенні аналітичного вимірювального процесу і призводить до

великих втрат енергетичних, матеріальних та інтелектуальних ресурсів.

Реалізація таких систем можлива на основі мультипараметричних мікроелектронних лазерних сенсорів, що є високо чутливими і швидкодіючими пристроями, тому їх створення є актуальним і перспективним.

Основною тенденцією розвитку систем екологічного моніторингу є розробка так званих «інтелектуальних» пристроїв, побудованих на базі твердотільних сенсорів і сучасних обчислювальних засобів. Мультисенсор контролює стан навколишнього середовища для виявлення відхилень і виключення роботи датчика поза встановлених меж. Програмне забезпечення дозволяє автоматично управляти процесом вимірів: включенням/виключенням, зміною діапазонів, перемиканням каналів вимірювань, частотою калібрування. Вибір алгоритму, тест-сигналів, точок і часу вимірів та ін., а також вибір фільтрів у відповідності з параметрами перешкод здійснюється відповідно до завдань вимірів або по командах керуючої ЕОМ. Мультисенсорний датчик проводить інтелектуальну обробку аналогових даних в реальному масштабі часу, забезпечує високий захист від помилкових спрацьовувань при високій чутливості до займання.

Останнім часом для вирішення багатьох аналітичних задач екологічного і технологічного контролю замість традиційних методів застосовуються мультисенсорні системи. При складанні мультисенсорних систем із датчиків з різними типами сигналів і електрофізичними характеристиками необхідне введення додаткових схем сполучення, а довготривалі зміни їх параметрів, різні для різного типу датчиків, вимагають досить частої перекалібровки кінцевих пристроїв.

Перспективним сучасним напрямком є формування мультисенсорних систем з однотипних датчиків, у цьому випадку датчики мультисенсорної системи мають єдиний тип сигналу, а варіація властивостей і вихідних характеристик досягається через варіацію внутрішніх параметрів і/або умов роботи. Однією з важливих переваг таких мультисенсорних систем є те, що їх вартість практично не перевищує вартості окремого датчика. При цьому використання сучасних мікро- і нанотехнологій дозволяє розробляти ці пристрої на одному кристалі з малими розмірами, масою і низьким енергоспоживанням.

Висока швидкодія і чутливість мікроелектронних сенсорів дозволяють не тільки запобігати аварійних процесів, які швидко розвиваються, але й здійснювати прогнозування виникнення аварій, викликаних витокami технологічних середовищ, комплексно автоматизувати моніторинг, наприклад, витоків з протяжних трубопроводів, технологічного обладнання газо-нафтоперераховувальних станцій і газових сховищ.

Включення датчиків витоків в автоматизовану систему управління технологічними процесами транспортування газо- та нафтопродуктів дає можливість здійснити активний контроль для забезпечення безпеки і безперервності ведення технологічного процесу. До теперішнього часу немає мультисенсорних систем для вирішення завдання контролю неорганічних газів – основних пріоритетних забруднювачів атмосферного повітря, включаючи сірководень і діоксид сірки. Екологічне неблагополуччя спонукає до створення нових методів і засобів екологічного моніторингу.

В даний час спостерігається тенденція розвитку інтелектуальних датчиків-сенсорів за рахунок розвитку багатофункціональних властивостей датчика. Задача розробки автоматичних систем для безперервного

моніторингу навколишнього середовища, які володіли б високою швидкістю, простотою обслуговування, надійністю в роботі і невисокою вартістю в порівнянні із зарубіжними аналогами, є досить актуальною.

## 5.2. Цифрові методи та пристрої вимірювання коефіцієнта відбиття

Цифровий метод застосовується для дистанційного вимірювання коефіцієнта направленої відбиття поверхні об'єкта за допомогою оптико-локаційного пристрою (ОЛП) базового типу. Перехід до цифрового надання й обробки вимірювальної інформації робить досяжним рівень точності до  $10^{-3}$  %, в той час як у аналогових вимірювачів точність не перевищує 1%.

Поліпшення точностних характеристик вимірювача проведено наступним чином. З локаційного рівняння ОЛП виділено взаємозв'язок між коефіцієнтом відбиття  $\rho$  поверхні, координатою зображення  $a_3$  на поверхні фотоприймача і дальністю  $l$ , яка має вигляд [2]

$$\rho = \frac{U_l}{A} l^2 = \frac{U_l}{A} \left[ \frac{b l_{\text{дн}} (a_3 \cdot \text{tg} \gamma + f)}{a_3 (b \cdot \text{tg} \gamma - l_{\text{дн}}) + b f} \right]^2,$$

де  $U_l$  - локаційний сигнал,

$A$  - коефіцієнт пропорційності, який об'єднує незалежні від  $l$  параметри ОЛП,

$b$  - вимірювальна база,

$l_{\text{дн}}$  - дальність налаштування,

$2\gamma$  - кут перетину оптичних осей випромінювача і фотоприймача,

$f$  - фокусна відстань приймального об'єктива.

Дистанційні характеристики оптико-локаційного вимірювача на основі базового ОЛП з світлодіодом АЛ-107 і лінійкою фотодіодів ФДК-148 підтвердили можливість технічної реалізації цифрового представлення коефіцієнта відбиття поверхні.

Алгоритм роботи оптико-локаційного вимірювача заснований на послідовному рахунку імпульсів, що виникають на виході фотодіодної лінійки при зміні дальності в результаті лінійного переміщення фокальної світлової плями по її майданчиках. Значення  $\rho$  визначається співвідношенням  $\rho = qn$ , де  $n$  - кількість імпульсів, а  $q$  - квант перетворювача, що зв'язує одиничну координату  $a_z$  з еквівалентним значенням  $\rho$ . Завдяки цифровому методу точність вимірювань  $\sim 10^{-1}\%$  обмежена розмірами фотоприймальних елементів і фокальної плями розсіювання, які в даному випадку  $\leq 10^{-1}$  мм.

Відбиття випромінювання від поверхні підрозділяється на три види: дзеркальне, спрямовано розсіяне та дифузне. Згідно з видом відбиття поверхні розподіляються на наступні типи:

- ортотропні, у котрих індикатриси відбиття наближаються до напівсферичних;
- дзеркальні, котрі мають достатньо виражений максимум у напрямку дзеркального відбиття;
- змішані.

Таку класифікацію відбиваючих поверхонь вважається доцільною, оскільки для будь-якої поверхні характер індикатриси може сильно змінюватися зі зміною кута підходу МПС до поверхні.

У межах кутів підходу  $80\dots 50^\circ$  тип індикатриси зберігається незмінним для всіх досліджених поверхонь. При більших значеннях кутів підходу тип поверхонь виявляється погано або навіть не виявляється зовсім, оскільки напрямки падаючого та дзеркально відбитого

променів стають надто близькими. При значеннях кутів підходу  $50...40^\circ$  форма індикатриси починає викривлятися, а найбільш сильне її викривлення відбувається при кутах підходу  $20...10^\circ$ . Характеристики для кутів підходу  $80...65^\circ$ , що відповідають ортотропній поверхні, дають індикатриси сферичної форми. Дзеркальні поверхні забезпечують відбиття для кутів  $80...50^\circ$ .

З урахуванням особливості зміни індикатриси розсіяння, слід зазначити, що для дифузної відбиваючої поверхні флуктуації відбитого сигналу обумовлені, в основному, лінійним переміщенням МПС, а для поверхні з яскраво вираженою складовою – кутовим переміщенням відносно самої поверхні. Тому сигнал, відбитий від дифузних поверхонь, флуктує менш, ніж для поверхонь з яскраво вираженою дзеркальною складовою.

. Точність вимірювання дальності в залежності від відбиваючих властивостей поверхні визначається такими первинними ознаками, як її відбиваючі властивості. Система, яка побудована на основі амплітудної селекції робочої дальності, приймає рішення про вимірювальну дальність згідно відомій нерівності

$$U_c \leq a\sqrt{U_{ш}^2} ,$$

де  $a$  – відношення сигнал/шум,

$\sqrt{U_{ш}^2}$  – рівень власних шумів на вході пристрою.

Розкид значень відстаней, вимірюваних МПС, в основному, визначається значним розкидом значень коефіцієнтів відбиття  $\rho$  підстиляючих поверхонь. Значення  $\rho$  для поверхонь, що часто зустрічаються, розрізняються більш, ніж у 10 разів, а з урахуванням кута підходу цей розкид зростає на 2 порядки.

Виходячи із закону зворотних квадратів відстаней, залежність вхідного потоку  $\Phi_{\text{вх}}$  від  $\rho$  і відстані  $l$  до неї має вигляд [2]

$$\Phi_{\text{вх}} = \frac{B}{l^2}. \quad (5.1.)$$

З рівняння випливає, що має місце одночасний вплив на вхідний потік випромінювання змін коефіцієнта відбиття поверхні  $\rho$  і відстані  $l$  до неї. Найбільш сильний вплив  $\rho$  виявляється при зондуванні твердих поверхонь у дальній зоні  $l$  роботи МПС. Прирошення сигналу, пропорційне  $1/l^2$ , у цій зоні незначне, і основний внесок у спектр дає зміна коефіцієнта відбиття.

Таким чином, аналіз заводової ситуації у відкритому оптичному каналі довжиною до 5 м дозволяє вважати:

- впливом аерозольних атмосферних перешкод можливо нехтувати,
- світловий фон постійного і флюктуючого характеру необхідно ураховувати з метою розробки відповідних методів завадо захисту,
- існує сильна залежність корисного сигналу від властивостей відбивної поверхні та кутів підходу до неї.

В оптичній локації коефіцієнт відбиття служить основною характеристикою для розпізнавання і класифікації об'єктів, а вимірювання коефіцієнта відбиття різних об'єктів є актуальним для наукових досліджень і приладобудування в області фотометрії. Розвиток фотометрії зв'язується з переходом до цифрового надання й обробці вимірювальної інформації.

Найпоширеним методом вимірювання спектрального коефіцієнта дзеркального відбиття

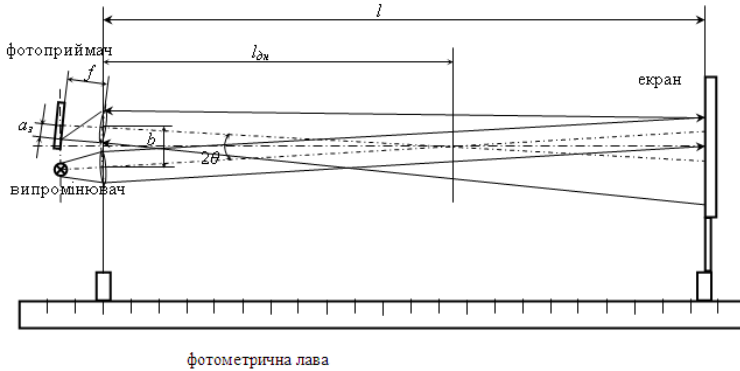
оптичних поверхонь є вимірювання інтенсивності відбитого світлового потоку, тобто аналогового сигналу [1, 2, 3]. Як правило, схема вимірювань передбачає порівняння вимірювального сигналу з опорним, утвореним шляхом розподілу світлового потоку випромінювача або відбитим від еталонної поверхні. Досить складні оптичні системи, що застосовуються в таких схемах, є джерелом системних похибок і, отже, невисокої точності вимірювань. Найбільша точність аналогових вимірювачів становить 1% в діапазоні коефіцієнта відбиття 0,2 ... 0,6, за межами якого похибка перевищує 3% [4, 5]. Одним із шляхів підвищення точності вимірювання відбиття (віддзеркалення) випромінювання є перехід до цифрового надання й обробки вимірювальної інформації, який робить досяжним рівень точності до  $10^{-3}$  %.

Для розробки цифрового методу вимірювання коефіцієнта направлено відбиття поверхні і параметрів відбитих світлових потоків з підвищенням точності та спрощенням вимірювального процесу використані дві закономірності, що супроводжують зближення ОЕС з поверхнею відбиття (віддзеркалення):

- залежність порогової дальності спрацювання фотоприймача  $l_{пор}$  від коефіцієнта відбиття поверхні  $\rho$ ,
- залежність координати зображення  $a_u$  на майданчику фотоприймача від дальності  $l$ .

На рисунку 5.1 представлено принципову схему вимірювань, що містить ОЛС, який структурно представляє собою відбивну оптичну систему, що включає випромінювач і багатоелементний фотоприймач. Сенсор орієнтований по нормалі до досліджуваної поверхні, яку імітує відбивальний екран, встановлений на фотометричній лаві. Вимірювач коефіцієнта направлено відбиття поверхні заснований на ОЛС базового типу та цифровому методі вимірювання [4].





**Рисунок 5. 1. Принципова схема вимірювань**

Метод заснований на двох наступних закономірностях, що описують процес зближення оптико-електронного сенсора з відбивною поверхнею:

1. У відповідності з рівнянням оптичної локації сигнал фотоприймача (ФП)  $U_{\phi}$  пов'язаний з відбивними властивостями поверхні співвідношенням

$$U_{\phi} = A\rho / l^2, \quad (5.2.)$$

де  $A = P_o S_{\phi} \tau_{пр} f_c(\theta) A_{вх} / 2\pi$  – коефіцієнт, який об'єднує параметри оптопар, незалежні від дальності  $l$ :

$P_o$  – потужність випромінювача, Вт,

$S_{\phi}$  – вольтова чутливість ФП, В/Вт,

$\rho$  – коефіцієнт відбиття поверхні,

$\tau_{пр}$  – коефіцієнт пропускання приймально-випромінювальної оптичної системи,

$f_c(\theta)$  – функція спрямованого випромінювання, що залежить від кута  $\theta$ ,

$A_{вх}$  – площа входної зіниці приймальної оптичної системи,  $\text{см}^2$ .

За принципом дії сенсор відноситься до оптико-локаційних пристроїв, в яких пучок променів, генерованих випромінювачем, через оптичний об'єктив падає на поверхню об'єкта локації, а відбитий поверхнею пучок через вхідний об'єктив надходить на фоточутливу поверхню приймача.

Відомо, що залежно від величини коефіцієнта відбиття поверхні від функції  $U_{\phi}(l)$  змінюється [5]. При цьому пороговий рівень  $U_{nop}$  сигналу ФП досягається на різних дальностях, що визначаються з рівняння (5.2):

$$l_{nop} = \sqrt{\frac{A}{U_{nop}}} \rho, \quad (5.3.)$$

де  $l_{nop}$  – порогова дальність спрацьовування фотоприймача,  
 $U_{nop}$  – порогова напруга фотоприймача.

Таким чином, рівняння (5.3) описує залежність  $l_{nop}$  від  $\rho$ , яка використовується при розробці методу.

2. При зміні дальності між сенсором та відбивною поверхнею світлове зображення переміщується по фотоприймачу, а координата  $a_u$  центру світлової плями визначається дальністю та параметрами приймально-випромінювального блоку наступним чином [6]:

$$a_u = \frac{bf(l - l_{\text{дн}})}{l \cdot l_{\text{дн}} - b \cdot \text{tg}\theta(l - l_{\text{дн}})}, \quad (5.4.)$$

де  $b$  – вимірювальна база,

$f$  – фокусна відстань приймального об'єктиву,

$l_{\text{дн}}$  – дальність налаштування,

$\theta$  – кут падіння-відбиття світлових потоків,

$l$  – дальність.

Поліпшення точнісних характеристик проведено наступним чином.

В результаті об'єднання закономірностей  $l_{nop}(\rho)$  та  $a_u(l)$  встановлено співвідношення між коефіцієнтом відбиття поверхні і координатою зображення в площині фотоприймача, яке виражається як

$$\rho = \frac{U_{nop}}{A} l^2 = \frac{U_{nop}}{A} \left[ - \frac{bl_{\partial n}(a_3 \cdot \text{tg}\theta + f)}{a_3(l_{\partial n} - b \cdot \text{tg}\theta) - bf} \right]^2. \quad (5.5.)$$

Графічний вигляд залежності  $\rho(a_u)$  показаний на рисунку 5.2.

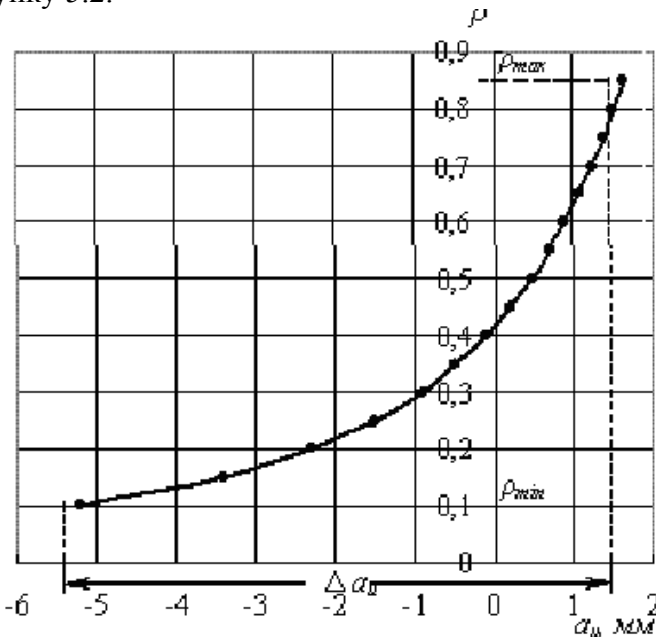


Рисунок 5.2. Розрахункова залежність  $\rho(a_u)$

Розрахунок проведений в діапазоні коефіцієнта відбиття  $\Delta \rho = 0,85 \dots 0,10$  і дистанцій  $l = 100 \dots 25$  см та

наступних значень оптико-геометричних параметрів приймально-випромінювального блоку:

$$b = 75 \text{ мм}, f = 50 \text{ мм}, l_{\text{дн}} = 70 \text{ см}, 2\theta = 6,4^\circ.$$

Указаному діапазону  $\rho$  відповідає зміщення координати центру фокальної плями між:

$$a_u(l_{\text{нор max}}) = 1,64 \text{ мм і}$$

$$a_z(l_{\text{нор min}}) = -5,2 \text{ мм.}$$

При цьому довжина траєкторії зміщення  $\Delta a_u = 6,84 \text{ мм}$ .

Оптико-електронний цифровий вимірювач коефіцієнта відбиття поверхні заснований на оригінальному цифровому методі вимірювання [4]. Макетування проводиться відповідно до розрахункової аналогової залежності  $\rho(a_u)$ .

Основу оптико-локаційного сенсора складає базава оптопара, що включає випромінювач АЛ-107 ( $\lambda_{\text{вип}} = 0,94\text{--}0,96 \text{ мкм}$ ) та лінійку фотодіодів ФДК-148 ( $\Delta\lambda_{\text{фп}} = 0,4\text{--}1,1 \text{ мкм}$ ) в якості фотоприймача (ФП) (рисунок 5.3).

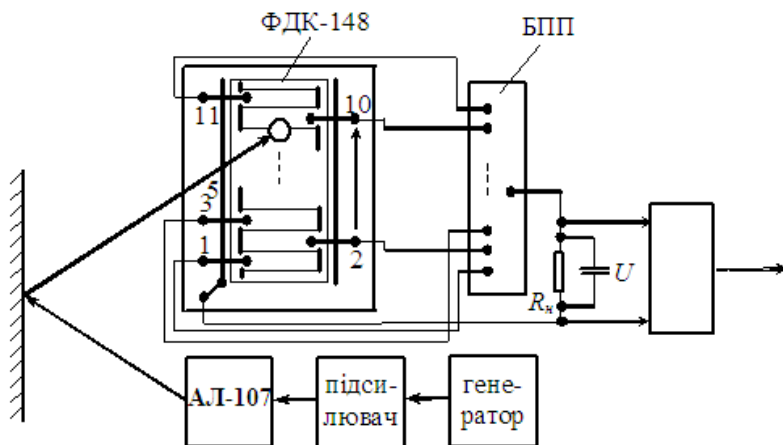


Рисунок 5.3. Структура цифрового сенсора коефіцієнта направленої відбиття

↑ - напрям переміщення світлового плями при зближенні

Оптичний сигнал формується у випромінювальному каналі за допомогою випромінювача і відповідних генеруючого і підсилювального елементів. Крім багатоелементного ФП в структуру вимірювального каналу входять також багатовходовий пороговий пристрій (БПП) і лічильник імпульсів (ЛІ).

Дискретизацію залежності між відбивними властивостями поверхні та координатою зображення здійснює багатоелементний ФП ФДК-148, тобто лінійка з 11-ти включених паралельно дискретних кремнієвих фотодіодів шириною  $a = 1$  мм і розділених непрозорим інтервалом в 0,15 мм.

Фотодіодна лінійка, що розташована у фокальній площині приймального об'єктива вздовж траєкторії зміщення зображення, розбиває її на ділянки, кількість яких визначається довжиною траєкторії.

Кожній ділянці відповідає інтервал координати, рівний ширині  $a$  елемента фотолінійки, і діапазон коефіцієнта відбиття, який розраховується з рівняння (5.5) або визначається графічно за допомогою рисунка 5.2.

Таким чином, багатоелементний фотоприймач представляється в якості геометричної шкали коефіцієнта відбиття.

Багатоелементний фотоприймач ФДК-148 виконує в сенсорі функції дистанційного АЦП, що перетворює в код лінійне переміщення.

При зменшенні дистанції від сенсора до відбивної поверхні світлова пляма лінійно переміщується по поверхні ФДК-148 до зовнішньої стінки пристрою, як показано стрілкою на рисунку 5.3.

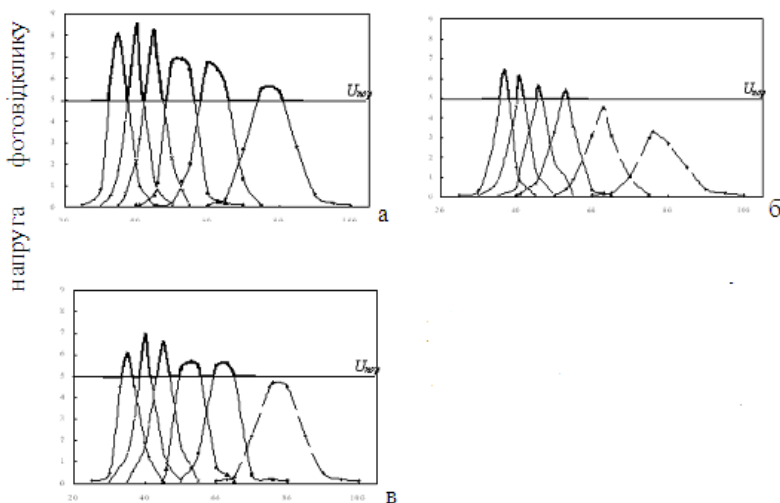
Проходячи послідовно по майданчиках фоточутливих елементів, світлова пляма викликає появу фотоедс  $U_{\phi}$  на виходах кожного з них. Виходи фоточутливих елементів з'єднані з входами БПП.

Розділені в часі сигнали фотовідповіді окремих елементів викликають появу на виході БПП послідовності імпульсів позитивної полярності, які надходять на ЛП. Числовий код, отриманий на виході ЛП, дорівнює кількості імпульсів  $n$  на виході БПП і визначає значення  $\rho$  у вигляді

$$\rho = qn,$$

де  $q$  – квант АЦП, рівний одиничній координаті і еквівалентному значенню  $\rho$ .

Експериментальні дистанційні характеристики (ДХ) макета цифрового сенсора коефіцієнта направлено відбиття з лінійкою фотодіодів ФДК-148 (рисунок 5.4), виміряні при трьох значеннях коефіцієнта відбиття  $\rho \approx 0,8; 0,6; 0,4$ , та являють собою ДХ елементів лінійки фотодіодів.



**Рисунок 5.4.** Дистанційні характеристики макета цифрового вимірювача коефіцієнта направлено відбиття

**а –  $\rho \approx 0,8$ ; б –  $\rho \approx 0,6$ ; в –  $\rho \approx 0,4$ ;**

**$U_{nop}$  – пороговий рівень фотосигналу**

Кожному елементу відповідає пилкоподібний імпульс, максимальна амплітуда і дистанційна прив'язка якого описуються співвідношенням (5.2.).

Вибір порогового рівня  $U_{\text{пор}}$  виходить з необхідності забезпечувати вимірювання мінімального значення коефіцієнта відбиття, якому повинен відповідати хоча б один імпульс. При напругах, що перевищують граничний сигнал, в даному випадку  $U_{\text{пор}} = 5$  мВ, досліджувана поверхня, залежно від величини  $\rho$ , характеризується певною послідовністю імпульсів.

За результатами вимірювань поверхні з  $\rho \approx 0,8$  відповідає пакет з 6-ти імпульсів, поверхні з  $\rho \approx 0,6$  – пакет з 5-ти імпульсів, поверхні з  $\rho \approx 0,4$  – пакет з 4-х імпульсів, тобто відповідність між коефіцієнтом відбиття поверхні та кількістю імпульсів на виході БПП підтверджує можливість його цифрового представлення.

Дистанційні характеристики оптико-локаційного вимірювача на основі базового оптико-локаційного сенсора (ОЛС) з світлодіодом АЛ-107 (випромінювач) і лінійкою фотодіодів ФДК-148 (фотоприймач) підтвердили можливість технічної реалізації цифрового представлення коефіцієнта відбиття поверхні.

Точність вимірювань цифровим методом, яка визначається абсолютною похибкою дискретності  $\Delta_{\theta}$ , не виходить поза межі  $\pm 0,5 q$  [7, 8, 9]. При цьому відносна похибка вимірювань описується виразом

$$\Delta_u = \frac{\Delta_{\theta} \cdot \Delta \rho}{\Delta a_u} \cdot 100\%, \quad (5.6.)$$

де  $\Delta a_u$  – величина лінійного переміщення, що піддається дискретизації,

$\Delta \rho$  - відповідний переміщенню діапазон  $\rho$ .

Оскільки у відповідності зі структурою лінійки фотодіодів ФДК-148  $q=1,15$  мм, то  $\Delta_d = \pm 0,575$  мм.

За умовами експерименту  $\Delta a_u = 6,84$  мм та  $\Delta \rho = 0,75$  звідки  $\Delta_z = 6,3$  %.

Відповідно до рівняння (5.6) точність вимірювань  $\rho$  може бути збільшена до  $10^{-1}$  %, в результаті зменшення  $q$  на порядок.

Відомо [6, 7], що в багатоелементних фотодіодних пристроях розміри чутливих елементів становлять кілька десятків мікрон. Це підтверджує технічну можливість досягнення даного рівня точності вимірювань.

Таким чином, метод побудови ОЛС коефіцієнта направлено відбиття здійснює цифрове перетворення вимірювального сигналу за допомогою багатоелементного фотоприймача.

Алгоритм роботи ОЛС заснований на послідовному рахунку імпульсів, що виникають на виході багатоелементного фотоприймача при зміні дальності в результаті лінійного переміщення фокальної світлової плями по її майданчиках.

Значення  $\rho$  визначається співвідношенням  $\rho = qn$ , де  $n$  – кількість імпульсів,  $q$  – квант перетворювача, що зв'язує одиничну координату  $a_u$  з еквівалентним значенням  $\rho$ .

Завдяки застосуванню цифрового методу досягається точність вимірювань  $\sim 10^{-1}$  %, обмежена розмірами фотоприймальних елементів і фокальної плями розсіювання, які в даному випадку  $\leq 10^{-1}$  мм.

Таким чином, цифровий метод вимірювання коефіцієнта направлено відбиття дозволяє проводити дослідження властивостей поверхні та високоточні вимірювання, до  $10^{-1}$  %, параметрів відбитих світлових потоків.



Також метод вирішує задачу підвищення точності вимірювання коефіцієнта направленої відбиття поверхні в результаті використання багатоелементного фотоприймача, який здійснює дискретизацію залежності між коефіцієнтом відбиття поверхні і координатою зображення, котра змінюється в процесі зменшення дистанції між приймально-випромінювальним блоком та відбивною поверхнею.

Оптико-електронний цифровий вимірювач коефіцієнта відбиття з відповідною структурою та алгоритмом функціонування робить досяжним рівень точності до  $10^{-3}$  %, що значно перевищує точність аналогових вимірювачів в 1%.

### **5.3. Функціональні задачі мультипараметричного сенсора**

Основна функціональна задача МПС – визначення параметрів досліджуваного об'єкта. Оскільки в більшості випадків МПС функціонує в газоподібних або дисперсних середовищах, що характеризуються коефіцієнтом розсіяння уперед і назад, коефіцієнтом заломлення, то саме ці параметри впливають на зміну структури інформації при передачі її від джерела до приймача [10, 11, 12]. На формування каналу зв'язку впливає також відбиваюча поверхня, вплив якої враховується за допомогою коефіцієнта відбиття.

Інформаційний оптичний сигнал, що являє собою серію імпульсів, по каналу зв'язку середовище–об'єкт–середовище попадає від передавача МПС на приймальну апертуру.

Аналіз змін потоку випромінювання на вході приймального пристрою МПС дає інформацію про характеристики середовища розповсюдження оптичного

випромінювання або поверхні відбиття, що знаходиться перед МПС [9]. Виходячи з цього потрібний гармонічний аналіз спектра завад, що виникають на атмосферних і поверхневих неоднорідностях [12, 13, 14].

МПС зазнає впливу зовнішніх перешкод і власних шумів, тому основний інформаційний сигнал у загальному випадку є випадковою величиною і повинний представлятися відповідними величинами: математичним очікуванням і дисперсією. Крім того, значення дисперсії основного інформаційного сигналу може використовуватися для оцінки точності вимірювань у різних умовах.

Основний інформаційний сигнал ЕОМ ставиться у відповідність результату вимірювання. Ця відповідність однозначна для конкретного режиму роботи вимірника, тому представлення характеристик основного інформаційного сигналу, нормованого до своєї максимальної величини ( $108^\circ$ ), не знижує наочності та достовірності випробувань.

Застосування МПС спрямовано на виявлення та ідентифікацію об'єктів однієї визначеної природи та отримання апріорних відомостей про об'єкти зосередженої, просторово-неоднорідної енергетичної природи, які підлягають дистанційному контролю.

За умови зондування об'єкта світловим потоком та порівняння відбитих сигналів з одиничним рівнем можливо визначення приналежності об'єкта.

В оптико-електронних МПС відбивного типу можлива реєстрація деформованого частинками аерозолі випромінювання в результаті його розсіювання в зворотному напрямку [14].

Суть явища полягає в генерації випромінювачем короткого і спрямованого імпульсу випромінювання, що розсіюється в аерозольному середовищі.

Приймальна оптична система розташовується поруч з випромінювачем і збирає розсіяне в зворотному напрямку випромінювання, що реєструється фотоприймачем.

Для побудови захисту використовуються флуктуації амплітуди відбитого сигналу, пов'язані з рухом. Для цього в електронний блок обробки МПС вводиться дискримінатор амплітуди імпульсів [15, 16, 17].

Для зниження вихідного відношення сигнал-завада вводиться нормування по амплітуді, чим підвищується захист до одиночних викидів, що значно перевищують корисний сигнал.

Удосконалення оптико-електронних систем МПС засновується на порівняльному аналізі структури сигналів, відбитих від зосередженої завади і метеоутворень природного та штучного походження.

Експериментальні дослідження властивостей атмосферних оптичних завад показують, що вони впливають на зондувальний імпульс МПС і його амплітудні та часові характеристики

Однією з визначальних ознак при аналізі відбитого сигналу є крутість наростання його амплітуди.

Закон зміни потужності на вхідному вікні фотоприймача в залежності від дальності  $l$  визначається аргументом  $1/l^2$  для зосередженої завади і  $e^{-\sigma_p l}$ , де  $\sigma_p$  – коефіцієнт розсіювання, для аерозольних утворень.

Це означає, що завадовий сигнал повільно змінюється для аерозольних утворень в порівнянні із сигналом від перешкоди, а при малих відстанях вироджується в лінійну функцію, що ефективно використовується для їхнього розрізнення.

В разі малих відстаней (2...5 м) енергетичне ослаблення оптичного сигналу за рахунок розсіювання в

сильно забрудненій атмосфері вважається зневажливо малим.

Аналіз впливу заводових засвітлювань показує, що на вхід фотоприймального пристрою МПС, нарівні з корисним оптичним сигналом, надходить заводовий, який зазвичай складається з флуктуацій світлового фону і прямого сонячного засвітлювання.

Основними джерелами зовнішніх природних завод є випромінювання небесних тіл, Землі та її покровів, атмосфери та її утворень.

Найбільшу заводу являє пряме попадання Сонця, вірніше його зображення, на поверхню фотоприймача. До поверхні Землі від Сонця через атмосферу доходить, в основному, випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,3...3,0 мкм. На майданчику, перпендикулярному напрямку на Сонце, воно створює енергетичну освітленість  $1350 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$  або освітленість понад  $10^5$  лк.

Відомі методи зменшення впливу прямого сонячного засвітлювання малоефективні, тому на практиці звичайно прагнуть виключити можливість прямого попадання Сонця в поле зору МПС, якщо це не суперечить його призначенню і умовам функціонування.

Розсіяне світло ясного неба створює на земній поверхні освітленість, що становить 20...30 % від освітленості, що створюється прямим сонячним засвітлюванням. Це для безхмарного неба становить 500 лк.

Коли фон, на якому проектується об'єкт, що спостерігається, не є рівномірним це рівносильне впливу на приймач флуктуючого потоку засвітлювання.

Цей потік представляється як сума двох складових – постійної, що погіршує чутливість, і змінної. Змінна складова безпосередньо бере участь в утворенні сигналу перешкоди.

Статистичні характеристики заводового сигналу однозначно визначаються імовірністю появи різних градацій хмарності. Розрізняються такі градації типів хмарності як дощові, купчасті, шарувато-купчасті та шаруваті, в залежності від розподілення коефіцієнтів відбиття, розсіяння та їхніх градієнтів

Визначається, що найбільш однорідні дощові хмари. Для шаруватих та шарувато-купчастих хмар характерна найбільша мінливість коефіцієнта відбиття. Найбільшою прозорістю володіють шарові хмари, а найменшою – дощові. Априорна інформація про фізичний стан об'єктів просторово-неоднорідної природи, тобто атмосферу та її утворення, включає також дані про функції пропускання та коефіцієнти поглинання.

Використання різноманітних видів явищ взаємодії лазерного випромінювання з атмосферою забезпечує принципову можливість лазерного зондування практично будь-якого її параметра: температури, тиску, щільності, вітру, вологості, аерозолів (хмари, тумани, димки та інше), оптичних параметрів та фізичних характеристик.

Для одержання інформації про атмосферні параметри та їх розподіл у часі та просторі досліджено вплив атмосфери на лазерний промінь з заданими характеристиками [18, 19]. Розшифровка ехо-сигналів забезпечує відновлення характеристик атмосфери, тобто вирішує зворотну задачу оптики атмосфери.

#### **5.4. Координатний метод вимірювання дальності мультисенсором**

Координатний оптоелектронний сенсор (ОЕС) є необхідним складовим МПС, що ефективно працює в нестационарних умовах експлуатації, захищений від помилкового спрацьовування при впливі дестабілізуючих зовнішніх чинників та здатен проводити дистанційний збір і обробку інформації щодо стану навколишнього середовища.

Розроблений ОЕС підвищує вірогідність та ефективність отримання інформації про параметри контрольованого об'єкта та забезпечує високоточне спостереження за навколишнім середовищем.

Алгоритм функціонування ОЕС, що працює у складі МПС та швидкісних вимірювальних систем, передбачає удосконалення дистанційного методу вимірювання параметрів відбитих світлових потоків [20]. Оптико-геометрична модель базового методу наведена на рисунку 5.5.

При базовому методі виміру дальності із зміною дистанції відбувається лінійне зсунення фокальної світлової плями по поверхні фотоприймача відповідно рисунку 5.5.

Переміщення зображення досліджуваної поверхні має місце при її скануванні. При цьому траєкторія переміщення фокальної плями лежить в одній площині і практично паралельна базової лінії при малих ( $< 5^\circ$ ) кутах перетину оптичних осей випромінювача і приймача.

Напрямок зміщення фокальної плями радіальне (при зближенні – від центральної осі датчика).

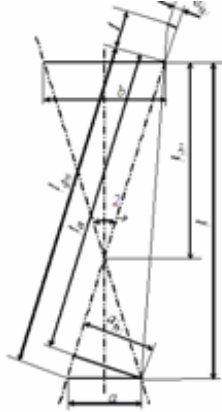


Рисунок 5.5. Оптико-геометрична модель метода

- $l_{fn}$  – віддаленість фотоприймача,
- $l_n$  – віддаленість проекції світлової плями,
- $f$  – фокусна відстань приймального об’єктива,
- $a$  – відстань між осями випромінювача і фотоприймача на відбивній поверхні,
- $a_n$  – проекція світлової плями в просторі предметів,
- $a_z$  – координата центру світлової плями в фокальній площині приймального об’єктива.

Залежність координати центру  $a_u$  світлової плями на фоточутливому майданчику приймача від дистанції  $l$  до об’єкта та інших оптико-геометричних параметрів ОЕС має вигляд [21]

$$a_z = \frac{bf(l - l_{\partial n})}{l_{\partial n} \cdot l - b \cdot tg\gamma(l - l_{\partial n})} \tag{5.1.}$$

Залежність  $a_u(l)$  являє собою дрібно-лінійну функцію, графік якої має вигляд гіперболи, перетинає вісь  $l$  в точці  $l = l_{\partial n}$ , в якій  $l - l_{\partial n} = 0$  і, відповідно до виразу (5.1),  $a_u = 0$  (рисунок 5.6).

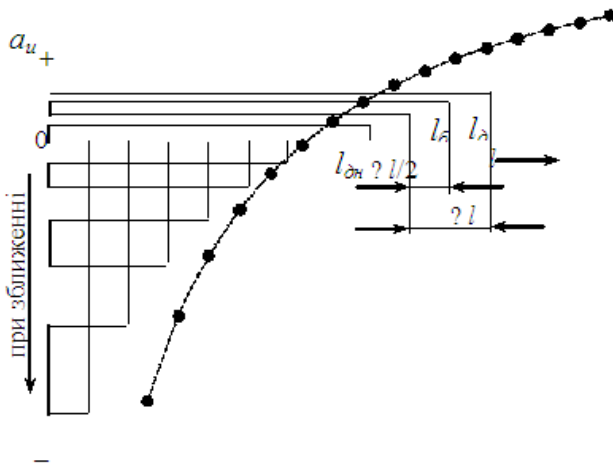


Рисунок 5.6. Дистанційна залежність координати  $a_u$  центру світлової плями на майданчику фотоприймача

При цьому центр зображення поєднується з фокусом об'єктива ФП. При  $l > l_{0n}$  значення  $a_u$  позитивні, а при  $l < l_{0n}$  – негативні, що визначає положення  $a_u$  щодо оптичної осі ФП.

Очевидно, що траєкторія сканування зображення несиметрична, відносно оптичної осі об'єктива ФП, зміщена в радіальному напрямку від осі симетрії ОЕС. Це необхідно враховувється при визначенні положення майданчику ФП, яке забезпечувало б потрапляння на нього фокальної плями у всьому діапазоні дистанцій.

Оскільки відповідно до виразу (5.1) вимірювана дальність  $l$  визначається координатою центру  $a_u$  фокальної світлової плями на чутливій поверхні ФП, то абсолютна похибка вимірювань дальності, на відміну від амплітудного методу,  $\Delta l \approx \Delta a_u$ , де  $\Delta a_u$  - розміри фокальної плями, що залежать від абераційних властивостей оптичної



системи ФП. Таким чином, в координатному методі точність реєстрації дальності забезпечується за рахунок вибору оптичної схеми ОЕС, а до амплітуди сигналу пред'являється лише вимога забезпечення рівня виявлення сигналу.

Застосування растрового методу для аналізу рухомого зображення розширює функціональні можливості ОЕС, дозволяючи вимірювати швидкість зближення з об'єктом локації. Залежно від положення зображення на майданчику ФП накладений на нього растр пропускає, або затримує відбитий об'єктом світловий потік, тобто проводить імпульсну модуляцію сигналу, що приймає значення 1 або 0 відповідно.

Враховуючи прямолінійність сканування зображення в базовому ОЕС, імпульсну модуляцію проводять растрові ґрати щілинного типу, що розташовані у фокальній площині об'єктива ФП.

Для ОЕС, що вимірює дальність, структура растрової решітки повинна забезпечувати розбиття дистанції на рівні інтервали  $\Delta l$ , в межах кожного з яких здійснюється цикл пропускання-затінення відбитого випромінювання.

Дистанційна характеристика ОЕС при наявності растрових ґрат доповнюється функцією коефіцієнта пропускання ( $\tau_o$ ) приймального об'єктива, змінюваного растровими ґратами наступним чином:

$$\tau_o = \begin{cases} 0 & (\text{при } l \leq \Delta l / 2) \\ \tau_o & (\text{при } \Delta l / 2 \leq l \leq \Delta l) \end{cases}, \quad (5.2.)$$

де  $\Delta l / 2$  – інтервал дистанції, відповідний затіненню світлового потоку.

Структура растрової ґрати для ОЕС, що вимірює такий параметр, як швидкість переміщення, розраховується за формулою, або графічно за допомогою координатної характеристики [15, 16].

Конструктивне виконання оптичного вузла ОЕС показано на рисунку 5.7.

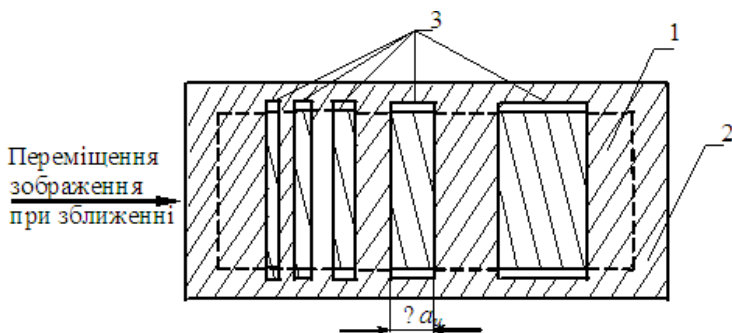
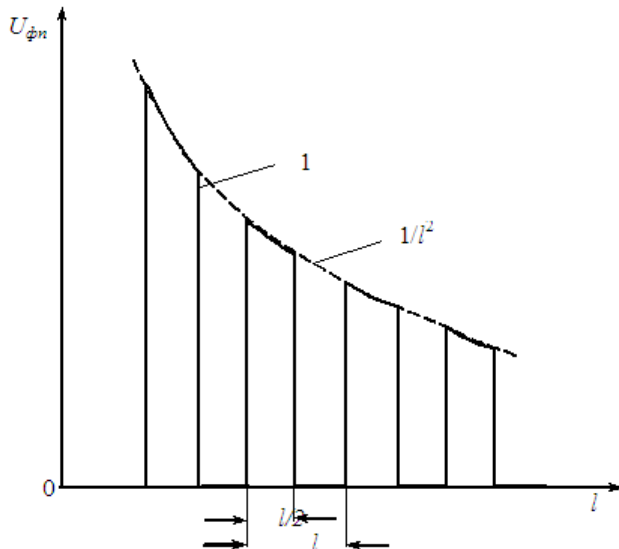


Рисунок 5.7. Структура растрових ґрат

На рисунку майданчик ФП 1 затінено растровими ґратами 2 системою прозорих секторів-щілин 3. Ширина щілини  $\Delta a_u$  становить різницю координат зображення на кордонах інтервалу дистанцій  $\Delta l/2$  і розраховується наступним чином:  $\Delta a_u = a_u(l_\delta) - a_u(l_\delta)$ , де  $l_\delta$  і  $l_\delta$  – ближній і дальній кордони  $\Delta l/2$ .

Дистанційна характеристика ОЕС з растровими ґратами обмежується функцією виду  $1/l^2$ , характерною для пристроїв даного типу (рисунок 5.8).



**Рисунок 5.8. Дистанційна характеристика ОЛС з растровими ґратами**

Растрові ґрати перетворюють безперервну функцію  $U_{\phi n}(l)$  в послідовність імпульсів, що мають дистанційну прив'язку, кількість яких, періодичність та дистанційне розташування визначаються структурою решітки.

У процесі зближення ОЕС з об'єктом вимірюється лінійне переміщення  $l$ , яке перетворюється на пропорційне його значенню кількість імпульсів  $n$ . Оскільки один імпульс утворюється при зміні дистанції на  $\Delta l$ , то  $l = \Delta l \cdot n$ . Вимірювання швидкості руху  $v$  зв'язується з частотно-часовими характеристиками імпульсного сигналу, сформованого за допомогою растрових ґрат, періодом  $T = \Delta l / v$  і частотою  $\tau = v / \Delta l$ .

Точність вимірювань растровим методом нормується розмірами зображення, тобто абераційними властивостями оптичних елементів. В оптичних системах

досягнуті високі ступені колімації світлових потоків, при яких розміри кружка розсіювання не перевищують  $10^{-3}$  мм.

Оскільки розміри зображення визначають мінімальну ширину щілини растрових ґрат  $\Delta a_u$ , а співвідношення між величинами  $l$  і  $a_u$  досягає  $10^3$ , то межею точності вимірювання дальності методом растрового кодування є 1 мм.

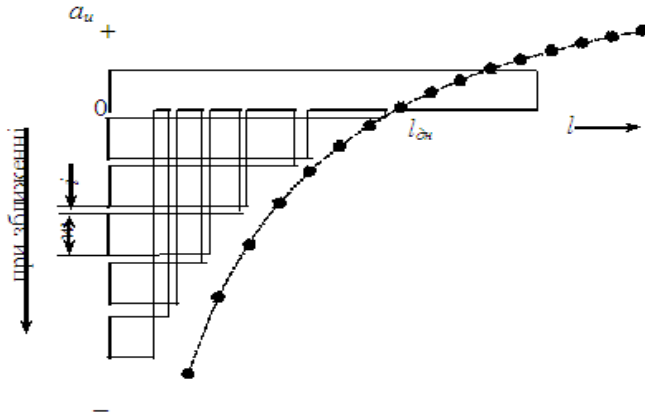
Таким чином, введений в оптичну систему ФП растр є носієм апріорної інформації про положення відбивача і являє собою пристрій, який кодує, що дозволяє оптичним методом вирішити завдання вимірювання МПС параметра швидкості [15, 16].

Багатоелементний ФП, розташований в фокальній площині приймального об'єктива вздовж траєкторії переміщення зображення, розбиває її на ділянки, кількість яких визначається довжиною траєкторії і шириною фотоприймальних елементів.

Оскільки багатоелементний ФП являє собою періодичну структуру, то вироблена ним дискретизація фоточутливої поверхні є рівномірною, а ФП грає роль геометричної шкали.

Однокоординатна фотодіодна лінійка, що складається з декількох смужкових фоточутливих елементів шириною  $w$ , розділених непрозорим інтервалом  $i \ll w$ , ділить траєкторію сканування зображення на відповідне число ділянок фотоприйому відбитого сигналу однакової довжини.

Схема дискретизації траєкторії зміщення світлової плями багатоелементним ФП показана на рисунку 5.9



**Рисунок 5.9. Схема дискретизації траєкторії зміщення світлової плями багатоелементним ФП**

Кожна ділянка шириною  $w$  забезпечує прийом відбитого сигналу на інтервалі дальності  $\Delta l$ , що визначається значеннями  $a_u$  на краях елемента виходячи з рівняння (5.1), звідки

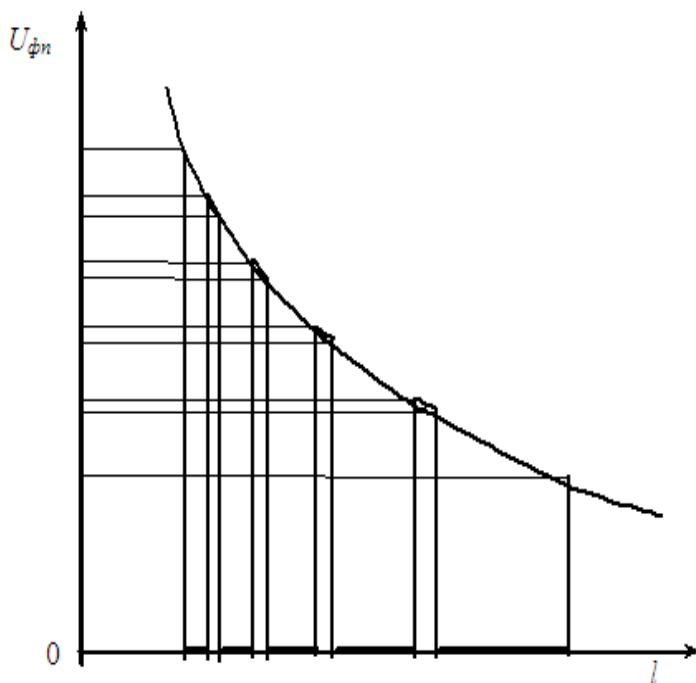
$$l = \frac{bl_{\partial n}(a_u \cdot \text{tg}\gamma + f)}{a_u(l_{\partial n} - b \cdot \text{tg}\gamma) - bf}. \quad (5.3.)$$

Залежність  $l(a_u)$  як зворотна від  $a_u(l)$  є функцією гіперболічного типу, тому багатоелементний ФП виробляє нерівномірну модуляцію поля зору по дальності  $l$  і, отже, сигналу фотоприймача  $U_{fn}$ .

Виходячи з цього, на відміну від растрового методу, який є пріоритетним для вимірювання дальності та її похідних, багатоелементний ФП застосовується для вимірювання інших параметрів, що формують відбитий

оптичний сигнал [17]. При зменшенні дистанції від ОЛС до відбивної поверхні світлове пляма послідовно проходить по майданчиках фоточутливих елементів і викликає появу фотоелектрорушійної сили  $U_{\phi n}$  на виходах кожного з них.

На рисунку 5.10 показана дистанційна характеристика ОЕС з багатоелементним ФП.



**Рисунок 5.10.** Дистанційна характеристика ОЕС з багатоелементним ФП

Розділені в часі сигнали фотовідповіді окремих елементів викликають появу на виході фотоприймача послідовності імпульсів позитивної полярності.

Дистанційна характеристика ОЕС  $U_{\phi n}(l)$  являє собою огинаючу послідовності прямокутних імпульсів, що виникають у фоточутливих елементах при переміщенні по їх поверхні світової плями.

Точність вимірювання безперервного сигналу  $U_{\phi n}(l)$  збільшується із зростанням числа елементів ФП, що досягається зменшенням розміру елемента і ширини розділового проміжку.

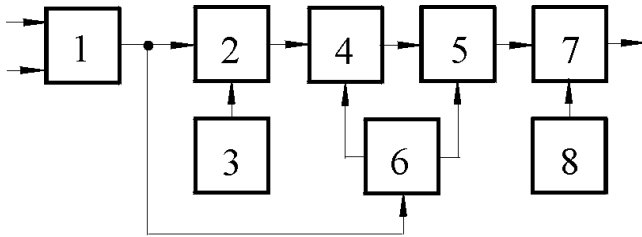
Досягнутий дозвіл становить 10...15 мкм при загальному числі елементів порядку  $10^3$ , що відповідає виразу для діапазону дистанцій ближньої локації та забезпечує дискретизацію по координаті з міліметровою точністю, аналогічно растровому.

Таким чином, на засаді аналізу різних дистанційних методів вимірювання параметрів відбитих світлових потоків найбільш оптимальним для мультипараметричного сенсора є метод, в якому використовується багатоелементний фотоприймач, розташований в фокальній площині приймального об'єктива ОЕС .

## **5.5. Аналого-цифровий перетворювач різниці фаз**

Робота аналого-цифрового перетворювача (АЦП) заснована на вимірюванні часового зсуву сигналів проміжної частоти основного і опорного каналів, пропорційного фазовому зсуву між синусоїдами

Загальний алгоритм функціонування АЦП різниці фаз, блок схема якого показана на рисунку 5.11, полягає в наступному.



**Рисунок 5.11. Блок-схема АЦП**

- 1 - формувач вимірювального інтервалу,**
- 2 - схема підсумовування,**
- 3 - кварцовий генератор,**
- 4 - лічильник,**
- 5 - буферний регістр пам'яті,**
- 6 - формувач сигналу перезапису даних,**
- 7 - ЦАП,**
- 8 - регульоване джерело опорної напруги.**

Сигнали з виходів підсилювачів-обмежувачів опорного і вимірювального каналів ОЛС поступають на входи формувача вимірювального інтервалу 1, на виході якого формується імпульс позитивної полярності, по тривалості рівний часу зсуву вимірювального і опорного сигналів. Частота повторення імпульсів рівна подвоєній проміжній частоті. Таким чином, вимірювання різниці фаз опорного і вимірювального сигналів зводиться до точного вимірювання часового інтервалу.

Вимірювальний імпульс з виходу 1 надходить на схему підсумовування 2, де відбувається його заповнення імпульсами з кварцового генератора 3. З виходу схеми 2 пачка імпульсів заповнюючої частоти, рівна по тривалості вимірювальному інтервалу, надходить на лічильник 4. З виходу 4 вимірювана величина в чисельному двійковому вигляді через буферний регістр пам'яті 5 надходить на вхід ЦАП 7.

Процесом перенесення чисельного значення вимірюваної величини з лічильника 4 за допомогою



регістра пам'яті 5 в ЦАП 7 керує формувач сигналу перезапису даних 6 з подальшим обнуленням лічильника.

Діапазон величини вихідної напруги ЦАП 7, необхідний для узгодження з реєструючими пристроями встановлюється за допомогою регульованого джерела опорної напруги 8.

З метою одержання лінійної залежності значення вимірюваних параметрів, наприклад дистанції, від фазового зсуву застосовується цифровий фазометр з перекриттям.

Потужність випромінювача регламентується відбивними властивостями поверхні об'єкту. Це визначає генерацію рівня потужності, достатнього для реєстрації відбитого сигналу по всьому діапазону дистанцій, тобто сигналу, що перевищує порогову чутливість фотоприймача.

Захист фотоприймача від низькочастотних і постійних завадових засвічень забезпечується включенням його безпосередньо у вхідний контур підсилювача, зашунтований індуктивністю. Нульовий фазовий зсув сигналу в підсилювачі досягається шляхом настройки вхідного і вихідного контурів на частоту модуляції.

Найкритичнішим є наведення електричного сигналу випромінювача, порівнянного по рівню з сигналом фотоприймача, на вхід підсилювача оптичного сигналу. Це призводить до зміни фази сигналу і збільшення погрішності вимірника.

Застосування у вхідних ланцюгах відповідних напівпровідникових елементів знижує шумовий поріг підсилювача, що визначає інтегральну чутливість ОЛС, не обмежену шумами. Для точності вимірювання дистанції не гірше 1 % співвідношення сигнал-шум  $S/N$  на виході блока ФП повинно бути не менше 7.

У підсумку алгоритм роботи АЦП вміщує:

- аналого-цифрове перетворення вхідних вимірювальних сигналів з узгодженням їх динамічних діапазонів з параметрами АЦП,
- метод вимірювання та задана точність визначають розрядність АЦП не менш 12-ти розрядів,
- час перетворення – не більш  $10^{-4}$  с,
- керування потужністю зондуючого випромінювання.

Необхідність звуження динамічного діапазону рівня приймального сигналу до 40 дБ потребує розбиття рівня вихідної потужності на два фіксованих значення 0 і – 40 дБ, що реалізується через однорозрядний порт виводу.

– Автоматичне балансування тракту підсилення постійного струму вимірювача, яке здійснюється за допомогою 10-ти розрядного АЦП з паралельним портом виводу, а також однорозрядного порту виводу, що відключає задавальний генератор.

– Індикація режимів і результатів вимірювання.

Нестандартний алгоритм дозволяє здійснювати автоматичне балансування тракту підсилювання постійного струму ОЛС за допомогою координатного АЦП на базі багатоелементного фотоприймача.

Структурна схема, що реалізує даний алгоритм на апаратному рівні, здійснює узгодження коефіцієнтів перетворення ЦАП та АЦП, близьке до “1”. Цим досягається збіжність алгоритму за мінімальну кількість циклів функціонування.

## 5.6. Алгоритм роботи мультипараметричного сенсора

З метою автономного використання МПС в системах збирання екологічної інформації до складу додано пристрій GSM-зв'язку.

Структурна схема МПС наведена на рисунку 5.12.

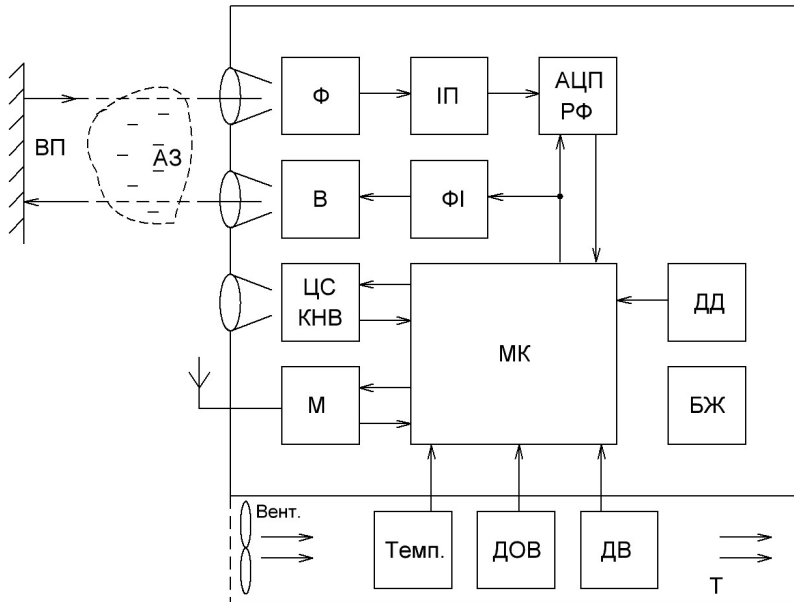


Рисунок 5.12. Структурна схема мультипараметричного сенсора  
Ф – фотоприймач, ІП – імпульсний підсилювач,  
АЦПРФ – аналогово-цифровий перетворювач різниці фаз,  
В – лазерний випромінювач, ФІ – формувач імпульсів,  
ЦСКСВ – цифровий сенсор коефіцієнта спрямованого відбиття,  
М – GSM-модем, МК – мікроконтролер, ДД – датчик дощу,  
БЖ – блок живлення, Вент. – вентилятор,  
Темп. – датчик температури, ДОВ – датчик оксиду вуглецю,  
ДВ – датчик вологості, ВП – відбиваюча поверхня,  
АЗ – атмосферні завади.

Алгоритм роботи сенсора наступний [20].

При надходженні крізь GSM-мережу SMS-команди на включення МПС мікроконтролер МК формує команду на підключення до джерела живлення датчиків оксиду вуглецю ДОВ, вологості ДВ, температури «Темп.» та датчика дощу ДД, а також на цифровий сенсор коефіцієнта спрямованого відбиття ЦСКСВ.

При надходженні керуючого сигналу мікроконтролером формується пакет вимірювальних імпульсів, які подаються на входи формувача імпульсів ФІ та аналогово-цифрового перетворювача різниці фаз АЦПРФ. Сформовані за тривалістю та підсилені за потужністю в ФІ вимірювальні імпульси за допомогою випромінювача В спрямовуються у напрямі відбиваючої поверхні ВП, віддзеркалюються, двічі проходять крізь атмосферні завади АЗ і з частковою потужністю надходять на фотоприймач Ф.

Підсилені імпульсним підсилювачем ІП за амплітудою імпульси фотовідповіді надходять на аналогово-цифровий перетворювач різниці фаз АЦПРФ, на другий вхід котрого подається опорний сигнал з МК. На виході АЦПРФ формується постійна напруга, амплітуда якої прямо пропорційна різниці фаз опорного та відбитого сигналів, яка надходить на вимірювальний вхід мікроконтролера МК.

Сигнали з датчиків оксиду вуглецю ДОВ, вологості ДВ, температури «Темп.» та датчика дощу ДД також надходять на окремі входи мікроконтролера МК.

Виміряні величини сигналів за допомогою програм мікроконтролера МК визначають коефіцієнти прозорості та відбивної здатності повітря, вологості, температури та кількості оксиду вуглецю, які формуються мікроконтролером у вигляді SMS-повідомлення і надсилаються у адресу, з якої надійшло командне SMS.

У випромінювальному блоці за допомогою лазерного діода, відповідних генеруючих і підсилювальних елементів формується оптичний ВЧ-сигнал нормованої потужності.

Підсилювальна частина випромінювального блоку містить високоомний буферний підсилювач на виході генератора і підсилювач потужності типу «перетворювач напруга-струм», безпосередньо навантажений на випромінювач.

Відбитий від поверхні досліджуваного об'єкту ВЧ-оптичний сигнал реєструється і перетворюється фотоприймачем, який навантажується на резонансний контур, що настроєний на модуляційну частоту.

Опорний сигнал формується гетеродином у перемножувачі. Сигнал з опорного генератора надходить на вхід перемножувача через часову лінію затримки, утворену елементами відкритого оптичного каналу далекоміра, а на вхід перемножувача – напряму. Гетеродинне перетворення частоти опорного і вимірювального сигналів здійснюється з використанням загального кварцового резонатора, що визначає частоту гетеродинного сигналу кожного каналу.

Високий ступінь стабільності ВЧ-сигналів опорного генератора і гетеродина досягається за допомогою кварцових резонаторів, частоти яких відрізняються на необхідну величину проміжної частоти. Таким чином, створені умови, що забезпечують високу точність вимірювань.

Блок випромінювача оптичного сигналу складається з генератора вимірювального сигналу, модулятора і випромінювача.

Частота вимірювального сигналу стабілізується за допомогою кварцового резонатора і точно підстроюється конденсатором.

Динамічний діапазон струму через випромінювач встановлюється за допомогою двох резисторів, один з яких задає максимальне значення робочого струму випромінювача, а сумарний номінал резисторів визначає мінімальне значення робочого струму випромінювача.

Блок фотоприймача складається з фотодіоду і резонансного підсилювача, який виконується на основі малощумячого польового транзистора. Блок формування опорного та вимірювального сигналів складається з гетеродина та двох перетворювачів частоти. Частота гетеродина стабілізується за допомогою кварцового резонатора і за допомогою конденсатора встановлюється на 1000 Гц меншою частоти генератора вимірювального сигналу.

Вимірювальний сигнал з частотою 10,7 МГц з виходу генератора вимірювального сигналу надходить на “затвор” транзистора, котрий здійснює модуляцію струму через випромінювач. Модульований оптичний сигнал з випромінювача за допомогою оптичної системи спрямовується у бік об’єкта, відстань до якого вимірюється.

Відбитий від поверхні досліджуваного об’єкта сигнал через приймальну оптичну систему надходить на фотоприймач і здійснює модуляцію струму, що протікає у його ланцюгу.

Фотоприймач навантажується на вхідний контур резонансного підсилювача, налагоджений на частоту 10,7 МГц.

З вихідного контуру сигнал, підсилений за амплітудою, за допомогою трансформаторного зв’язку подається до входу перетворювача частоти. На другий вхід перетворювача надходить сигнал з гетеродину, частота генерації котрого менше частоти задавального генератора вимірювального сигналу на 1000 Гц.

Низькочастотна складова перетвореного вимірювального сигналу, відділена від ВЧ-складових за допомогою фільтра, надходить до входу підсилювача-обмежувача.

З виходу підсилювача-обмежувача вимірювальний НЧ-сигнал надходить до входу цифрового перемножувача. На другий вхід перемножувача надходить опорний НЧ-сигнал, одержаний аналогічно вимірювальному в результаті перемноження сигналів задавального вимірювального генератора та гетеродина.

Опорний і вимірювальний сигнали однієї частоти 1000 Гц, перемножені цифровим перемножувачем, але зсунуті один відносно другого по фазі в результаті часової затримки вимірювального сигналу, що виникає внаслідок проходження подвійної відстані до об'єкта, надходять на ВЧ-фільтр. На виході ВЧ-фільтра формується постійна напруга, амплітуда якої прямо пропорційна різниці фаз опорного і вимірювального сигналів та змінюється за лінійним законом. Отримана постійна напруга через аналоговий повторювач надходить до мікроконтролера, де відбувається розрахунок вимірювального параметру.

Оптимальна схема екранування функціональних вузлів МПС забезпечує їх електромагнітну сумісність з метою виключення взаємного впливу.

Найбільша складність полягає в тому, що на електричний вхід малощумячого підсилювача оптичного сигналу наводиться електричний сигнал від випромінювача, по рівню порівнянний з сигналом, що отримується від фотоприймача. Це призводить до зміни фази сигналу на виході радіоелектронного тракту вимірника і до прямої похибки вимірювання. При цьому чутливість, обмежена шумами, не є критичним параметром, що обмежує інтегральну чутливість МПС, оскільки рівень оптичних приймальних сигналів за всіх

умов роботи вище шумового порога вхідного підсилювального елемента. Це досягається за рахунок застосування у вхідних ланцюгах сучасних напівпровідникових елементів.

Завади різного походження не можуть відчутно знизити чутливість МПС внаслідок вузькосмугастості вхідного підсилювача і відсутності елементів конструкції, що можуть служити антеною для завад на робочій частоті вимірника (10,7 МГц). Необхідна чутливість забезпечується за рахунок багаторівневого екранування конструктивних елементів передавального і приймального вузлів і суворої електромагнітної розв'язки електричних ланцюгів живлення і сигналів управління.

## **5.7. Практичне використання мультипараметричного сенсора**

Сучасний рівень складності завдань, що вирішуються за допомогою інформаційних систем, постійно зростає. Внаслідок ускладнення умов функціонування об'єктів спостереження, таких як швидкісна зміна у часі контрольованих параметрів, виникає необхідність підвищувати швидкість виявлення, що дозволяє виключити помилкове спрацювання інформаційних систем. Висока швидкодія, чутливість та стабільність роботи в умовах впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів на МПС в системах моніторингу навколишнього середовища дає можливість прогнозувати небезпечні ситуації, запобігати аварійним процесам і попередити їх наслідки. Впровадження МПС сприятиме розвитку таких галузей як приладобудування, радіоелектроніка, опти- та мікроелектроніка, медицина. Включення МПС в автоматизовану систему управління процесами транспортування газо- та нафтопродуктів



дозволить здійснити активний контроль для забезпечення безпеки і безперервності ведення технологічного процесу. МПС, які працюють з високою точністю в умовах нестационарних завад, мають захист від хибного спрацювання, що дозволяє забезпечити безперервне спостереження за об'єктом [17] у складі інформаційно-діагностичних систем для транспорту та пожежної безпеки.

Використання розроблених МПС, як датчиків контролю простору, можливо в системах тривожної сигналізації, а також в інтелектуальних охоронних та захисних системах безпеки.

Безконтактні датчики-сенсори повністю виключають ризик отримання травм при роботі з технологічним обладнанням, що дозволяє підвищити продуктивність праці та попередити нещасні випадки на виробництві.

Підприємства, які випускають електронні прилади, зацікавлені у використанні МПС, здатних до одночасного оперативного дистанційного контролю декількох геометричних параметрів об'єктів, які після збирання приладу не можна проконтролювати візуально.

Економічна доцільність МПС полягає в можливості отримання більш достовірної інформації за короткий час, навіть у режимі on-line, в автоматичному режимі.

Цифровий метод вимірювання коефіцієнта спрямованого відбиття і параметрів відбитих світлових потоків, що збільшує точність вимірювання до  $10^{-1}$  %, має практичне застосування в оптичному приладобудуванні, світлотехнічній промисловості та інших галузях

Використання нового мультисенсора в медицині дозволяє проводити тестування біомедичних тканин неконтактним методом, що належить до нетравматичної діагностики.

Отримані результати мають суттєву соціально-економічну значущість як перспективний інструмент для вирішення проблеми прогнозування виникнення аварійної ситуації навколишнього середовища, включаючи водні об'єкти, а також прийняття рішень, щодо скорочення можливих збитків та запобігання екологічних катастроф. Оперативне випереджаюче оповіщення населення про аварійну ситуацію виключить людські жертви при катастрофах.

МПС, здатний до складної обробки отриманих сигналів, врахування сторонніх впливів та отримання з них достовірної інформації, а також раціональної зміни режимів роботи в залежності від обставин, для розпізнавання та класифікації природних і штучних об'єктів використовує різницю їх відбивної здатності. МПС застосовує у вимірюваннях сучасні інформаційні технології, які передбачають перехід від аналогового до цифрового представлення сигналу та спілкування з комп'ютерною мережею для контролю зміни екологічної обстановки в режимі реального часу.

Контроль викидів шкідливих речовин в повітрі є одним з найважливіших завдань. Джерелом забруднення виробничого повітряного середовища є технологічні процеси, пов'язані із застосуванням або утворенням шкідливих летючих речовин, концентрація яких може досягати величин, які становлять небезпеку для здоров'я працюючих.

На особливо небезпечних ділянках потрібен безперервний контроль вміст домішок в повітрі технологічної зони, щоб своєчасно попередити пожежу, вибух або отруєння персоналу. МПС може бути використаний у складі засобів контролю концентрації шкідливих речовин, що дозволяє вирішити задачі моніторингу основних забруднювачів повітря.

## Основні результати і висновки по розділу 5

Основною тенденцією розвитку систем екологічного моніторингу є розробка адаптивних сенсорів і сучасних обчислювальних засобів. Існуючі системи мають ряд істотних недоліків: тривалий час підготовки, вартість, вузька спеціалізація, складність в обслуговуванні, що робить їх малоефективними при проведенні вимірювального процесу і призводить до великої втрати матеріальних та інтелектуальних ресурсів. МПС має істотні переваги над відомими, такими як підвищення вірогідності, точності, надійності і ефективності отримання інформації про контрольовані параметри в нестационарних умовах експлуатації, тобто при дії зовнішніх дестабілізуючих факторів та завод.

Новизна сенсора полягає в тому, що він ефективно працює при нестационарних умовах експлуатації, захищений від помилкового спрацьовування та здатен проводити дистанційний збір і обробку інформації про об'єкти спостереження, а також володіє надійними експлуатаційними характеристиками – малою споживаною потужністю, малим часом виходу на робочий режим і високою стабільністю електричних параметрів. МПС створений в єдиній структурі, що складається з декількох каналів, заснованих на загальному фізичному принципі дії, в кожному з котрих здійснюється вимірювання певного параметра досліджуваного об'єкта.

Модифікований цифровий метод і методика вимірювання коефіцієнта направлено відбиття поверхні і параметрів відбитих світлових потоків має велику значимість за рахунок підвищення точності та спрощення вимірювального процесу. Для реалізації ефективної логіки роботи МПС удосконалена та покращена технологія виміру контрольованих параметрів навколишнього

середовища за рахунок інтелектуальної обробки вимірних поточних значень, що підвищує достовірність отриманих даних в умовах нестаціонарних оптичних завад та дестабілізуючих факторів.

Обґрунтована можливість розпізнавання оптичних сигналів та виділення з них корисної інформації МПС в умовах дії нестаціонарних завад та дестабілізуючих зовнішніх чинників природного та штучного походження.

Удосконалений фазовий оптико-локаційний метод реєстрації переміщення об'єктів відрізняється тим, що вимірювання проводиться на основі аналізу форми і часових співвідношень переміщення поверхні контрольованого об'єкту. Перевагою МПС є також узгодження вимірювального тракту з джерелом сигналу по чутливості, динамічному діапазону, вибірковості і придушенню завад різного виду. Він адаптує параметри до зовнішніх чинників і умов, забезпечує автоматичний самоконтроль, проводить корекцію похибок та одночасний контроль декількох параметрів об'єкта спостереження та раціональної зміни режимів роботи в залежності від стану навколишнього природного середовища. МПС здатний до складної обробки отриманих сигналів, врахування сторонніх впливів, отримання з них достовірної інформації та спілкування з комп'ютерною мережею, що є істотною перевагою над відомими сенсорами та дає можливість контролю зміни екологічної ситуації в режимі реального часу. Методики збирання і обробки оперативних даних на контрольних ділянках за допомогою адаптивного МПС виключають вплив перешкод в атмосферному каналі на його функціонування. Сенсор дозволяє проводити науковий моніторинг, за допомогою якого можливо виявити природні та антропогенні процеси, що впливають на стабільність навколишнього середовища.

## Список використаних джерел до розділу 5

1. Лепих Я. И., Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Сантоний В. И. Пути интеллектуализации оптико-электронного сенсора // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології, 2014, Т. 11, № 2, С. 62–64.
2. Мусьяков М. П., Миценко И. Д., Ванеев Г. Г. Проблемы ближней лазерной локации: Учебное пособие для ВТУЗов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 295 с.
3. Зеленков І. А. Фотометрія. К.: НАУ, 2003.
4. Патент України на корисну модель № 51732 G 01 N 21/55, 21/47, заяв. № u 2010 02078, пріор. 25.02.2010, публ. 26.07.2010, Бюл. № 14. Спосіб вимірювання коефіцієнта направленного відбиття поверхні. Иванченко І. О., Сантоний В. І., Сминтина В. А.
5. Иванченко И. А., Сантоний В. И. Применение дискретизации оптического сигнала для измерения коэффициента направленного отражения // Збір. матер. Всеукр. н.-практ. конф. “Сучасні наукові досягнення – 2008”, 29-30 листопада 2008 р., Миколаїв, Т. II, С. 277–283.
6. Иванченко И. А., Сантоний В. И., Будиянская Л. М. Оптико-электронный дистанционный сенсор с растровой решеткой // Тр. научн.-практ. конф. “СИЭТ-2004. Одеса, 2004. – С. 139.
7. Иванченко И. А., Сантоний В. И., Будиянская Л. М. Дистанционный оптико-электронный датчик с растровой решеткой // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005.– № 4.– С. 31–34.
8. Смынтина В. А., Иванченко И. А., Сантоний В. В., Будиянская Л. М. Оптико-локационный измеритель коэффициента направленного отражения // Тези доповідей V Української наукової конференції з фізики

напівпровідників, 9–15 жовтня 2011 р., м. Ужгород, – С. 174.

9. Лепих Я. И., Сантоний В. И., Иванченко И. А., Будиянская Л. М. Лазерный дистанционный обнаружитель пленок нефтепродуктов на морской поверхности // Збірник доповідей та статей Всеукр. наук.-практ. конф. “Екологія міст та рекреаційних зон”, 2–3 червня 2011 р., м. Одеса, С. 100–102.

10. Лепіх Я. І., Сантоній В. І., Іванченко І. О., Будіянська Л. М. Створення мультипараметричного сенсора для екологічного моніторингу навколишнього середовища // Сборник докладов II-ой Междунар. н.-практ. конф. «Современные ресурсосберегающие технологии. Проблемы и перспективы», 1–5 октября 2012 г., Одеса.– С. 264–268.

11. Будіянська Л. М., Лепіх Я. І., Іванченко І. О., Сантоній В. І. Дослідження впливу завод в атмосферному каналі на структуру інформаційного сигналу // Матеріали XXV-ой междунар. научн. конф. «Дисперсные системы», 17–21 сентября 2012, г. Одеса. – С. 37–38.

12. Іванченко І. О., Лепіх Я. І., Сантоній В. І., Будіянська Л. М. Оптико-локаційний датчик диму // Там же, С. 95–96.

13. Лепіх Я. І., Сантоній В. І., Будіянська Л. М., Іванченко І. О. Метод моделювання умов функціонування мультипараметричного датчика відстані у статичному та динамічному режимах // Матеріали XII Міжнар. н.-техн. конф. “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах” (ВОТТП-12-2013), 3–8 червня 2013 р., Одеса. – С. 42–43.

14. Лепіх Я. І., Сантоній В. І., Будіянська Л. М., Іванченко І. О. Випробувальний стенд та дослідження впливу атмосферних завод на структуру оптичного інформаційного сигналу // Там же, С. 44–45.

15. Иванченко И. А., Будиянская Л. М., Лепих Я. И. Оптический дальномер как измеритель скорости // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 2013, Вип. № 3, С. 30–34.
16. Деклараційний патент України на корисну модель № 91082 G 01 S 17/02, G 01 S 17/58, заяв. у 2013 14049, пріор. 03.12.2013, публ. 25.06.2014, Бюл. № 12 “Спосіб вимірювання швидкості руху”. Иванченко І. О., Сантоній В. І., Будіяньська Л. М., Лепіх Я. І.
17. Будиянская Л. М., Лепих Я. И., Сантоний В. И., Янко В. В. Фотоприемный тракт детектора возгораний // Материалы XXVI междунар. науч. конф. «Дисперсные системы», 22–26 сентября 2014 г., Одесса. – С. 30.
18. Иванченко І. О., Будіяньська Л. М., Лепіх Я. І. Метод вимірювання спектрального складу оптичного випромінювання в ІЧ-області // Тези доповідей 6-ої Міжнар. н.-техн. конф. “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-6)”, 29 вересня – 3 жовтня 2014 р., Одеса, Україна. – С. 87.
19. Лепіх Я. І., Иванченко І. О., Будіяньська Л. М., Сантоній В. І. Вплив завад в атмосферному каналі на характеристики оптико-локаційного сенсора // Тези доповідей 6-ої Міжнар. н.-техн. конф. “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-6)”, 29 вересня – 3 жовтня 2014 р., Одеса, Україна, С. 90.
20. Лепіх Я. І., Иванченко І. О., Будіяньська Л. М., Сантоній В. І., Янко В. В., Кияк Б. Р. Алгоритм роботи класифікатора об’єктів у складі інтелектуального оптико-локаційного сенсора // Тези доповідей 6-ої Міжнар. н.-техн. конф. “Сенсорна електроніка та мікросистемні технології (СЕМСТ-6)”, 29 вересня – 3 жовтня 2014 р., Одеса, Україна, С. 118.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

Книга присвячена опису розвитку методів і систем ближньої оптичної локації, виходячи із сучасних вимог до їх тактико-технічних характеристик та можливостей новітньої елементної бази. Однією з найважливіших задач удосконалення інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) є інтелектуалізація датчиків первинної інформації.

Оптико-електронний перетворювач (ОЕП) у ІВС оптичної локації засновується на методах збору та обробки інформації, що вміщується у банку апріорних відомостей про об'єкти різної фізичної природи, який дозволяє однозначно визначати групову приналежність об'єкта локації та індивідуальні ознаки за спектральними, енергетичними і просторовими характеристиками, що піддаються дистанційному контролю просторової зони за допомогою ОЕП.

Оптичний сигнал на вході ОЕП аналізується методом комп'ютерного моделювання оптичного каналу з урахуванням завадової ситуації та властивостей поверхні відбиття як ті, що мають найбільш істотний вплив на характеристики ОЕП. Результати динамічних досліджень виявляють, що похибка вимірювань від впливу на точність відбивних властивостей поверхні об'єкта і швидкісного режиму зближення не перевищує нормований рівень 1%.

Використання прямолінійного фазового методу для вимірювання малих дистанцій дозволяє збільшити інформаційний потік у ОЕП до 1,6 Мб/с, що відносить його до приладів високого класу точності. Розповсюдження застосування ОЕП у наносекундний часовий діапазон передбачає дослідження просторово-часової залежності локаційних сигналів, що визначає відповідну структуру складових як корисного, так і завадового сигналів.



Методика оцінки параметрів та інформативності відбитого випромінювання базується на аналітичному визначенні часової залежності локаційних сигналів та співвідношенні, що пов'язує роздільну здатність ОЕП із швидкістю, часовими характеристиками та точністю вимірювань і покращує оперативну обробку сигналу.

Кореляційні властивості оптичного сигналу відбиття обумовлюють перевагу кореляційних методів обробки, які володіють максимальною завадостійкістю та не залежать від спотворень форми досліджуваних сигналів.

Структура ОЕП оптимізована з урахуванням статистичної обробки оптичних сигналів, що має ряд особливостей, пов'язаних з квантовою структурою оптичного поля, відмінною для слабого та сильного сигналів. Автоматизована система оперативного моніторингу рівня води у відкритих водоймах на телекеруваних ОЕП для попереджувального протипаводкового оповіщення населення та забезпечення екологічної безпеки створена на базі моделі водного об'єкта, що ураховує його гідродинамічні та гідрофізичні параметри. Підвищення надійності і швидкодії вимірювань досягається методом визначення структури корисного і завадового сигналів, як складових оптичної хвилі, у відповідності з просторово-часовою залежністю локаційних сигналів.

Алгоритм роботи та структура системи у складі ОЕП та оригінального GSM-телеметричного пристрою з залученням засобів телекомунікації GSM-зв'язку з інформаційним центром забезпечує отримання надійної інформації в будь-який момент часу. ІВС, структурована за схемою системи оперативного моніторингу рівня води, реалізується в галузі вібродіагностики задля визначення безпечних меж вібрації обладнання та коливних об'єктів в цілому.

Оптико-локаційний віброметр (ОЛВ) вимірює віброзміщення в діапазоні від десятих часток міліметра до величини, рівній половині довжини хвилі сигналу модуляції зондуючого лазерного випромінювання, з частотами вібрації в діапазоні 0...1000 Гц.

Керуючий телеметричний пристрій та інтерфейс зв'язку ОЛВ з центром збору та обробки даних дозволяють отримувати повідомлення про технічний стан об'єкта.

Вібродіагностична ІВС, працююча у режимі on-line, придатна для впровадження у таких високотехнологічних галузях промисловості, як енергетика, транспорт та будівництво.

Особливе значення вібродіагностичної ІВС полягає у економічному ефекті від впровадження, який складається у запобіганні непередбаченого руйнування та дозволяє уникнути значних матеріальних втрат. Без перебільшення значним є вірогідний соціальний ефект, що досягається за рахунок забезпечення безпеки праці та попереднього оповіщення людей про можливість руйнування споруд, будов та обладнання, що виключить людські жертви при техногенних катастрофах.

Основною тенденцією розвитку систем екологічного моніторингу є розробка адаптивних сенсорів і сучасних обчислювальних засобів. Існуючі системи мають ряд істотних недоліків: тривалий час підготовки, вартість, вузька спеціалізація, складність в обслуговуванні, що робить їх малоефективними при проведенні вимірювального процесу і призводить до великої втрати матеріальних та інтелектуальних ресурсів.

Мультипараметричний сенсор має істотні переваги над відомими, такі як підвищення вірогідності, точності, надійності і ефективності отримання інформації про контрольовані параметри в нестационарних умовах експлуатації, тобто при дії зовнішніх дестабілізуючих

факторів та завад. Новизна сенсора полягає в тому, що він ефективно працює при нестаціонарних умовах експлуатації, захищений від помилкового спрацювання та здатен проводити дистанційний збір і обробку інформації про об'єкти спостереження, а також володіє надійними експлуатаційними характеристиками – малою споживаною потужністю, малим часом виходу на робочий режим і високою стабільністю електричних параметрів.

МПС створений в єдиній структурі, що складається з декількох каналів, заснованих на загальному фізичному принципі дії, в кожному з котрих здійснюється вимірювання певного параметра досліджуваного об'єкта.

Для здійснення управління режимом роботи МПС до його складу входить телеметричний пристрій, що здійснює запис вимірюваних параметрів навколишнього середовища та пересилання інформації по каналах стільникового зв'язку в центр збирання та обробки даних системи комплексного екологічного моніторингу.

Модифікований цифровий метод і методика вимірювання коефіцієнта направлено відбиття поверхні і параметрів відбитих світлових потоків має велику значимість за рахунок підвищення точності та спрощення вимірювального процесу.

Для реалізації ефективної логіки роботи МПС удосконалена та покращена існуюча технологія виміру контрольованих параметрів навколишнього середовища за рахунок інтелектуальної обробки вимірюваних поточних значень, що підвищує достовірність отриманих даних в умовах нестаціонарних оптичних завад та дестабілізуючих факторів.

Обґрунтована можливість розпізнавання оптичних сигналів та виділення з них корисної інформації МПС в умовах дії нестаціонарних завад та дестабілізуючих зовнішніх чинників природного та штучного походження.

Удосконалений фазовий оптико-локаційний метод реєстрації переміщення об'єктів відрізняється тим, що вимірювання проводиться на основі аналізу форми і часових співвідношень переміщення поверхні контрольованого об'єкту.

МПС проводить одночасний контроль декількох параметрів об'єкта спостереження та раціональної зміни режимів роботи в залежності від стану навколишнього природного середовища, що має велике значення для комплексних систем екологічного моніторингу, оскільки значно підвищить їх технічний рівень.

Методики збирання і обробки оперативних даних на контрольних ділянках за допомогою адаптивного МПС виключають вплив перешкод в атмосферному каналі на його функціонування. Сенсор дозволяє проводити науковий моніторинг, за допомогою якого можливо виявити природні та антропогенні процеси, що впливають на стабільність навколишнього середовища.

## ***Відомості про авторів:***

**Лепіх Ярослав Ілліч** – доктор фіз.-мат. наук, професор, лауреат Державної премії України у галузі науки і техніки, заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії наук вищої школи України, директор Міжвідомчого науково-навчального фізико-технічного центру МОН та НАН України при ОНУ імені І. І. Мечникова;

**Сантоній Володимир Іванович** – старший науковий співробітник ОНУ імені І. І. Мечникова;

**Будіянська Людмила Михайлівна** – завідувача науково-дослідною лабораторією «Датчики та реєструючі системи» ОНУ імені І. І. Мечникова;

**Іванченко Іраїда Олександрівна** – старший науковий співробітник ОНУ імені І. І. Мечникова;

**Янко Володимир Васильович** – науковий співробітник ОНУ імені І. І. Мечникова.

*Наукове видання*

**Лепіх Ярослав Ілліч,  
Сантоній Володимир Іванович,  
Будіянська Людмила Михайлівна,  
Іванченко Іраїда Олександрівна,  
Янко Володимир Васильович**

# **ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ БЛИЖНЬОЇ ЛОКАЦІЇ**

**МОНОГРАФІЯ**

За редакцією Я. І. Лепіха

Підп. до друку 20.07.2019. Формат 60x84/16.  
Ум.-друк. арк. 17,09. Тираж 100. Зам. № 1968.

**Видавець і виготовлювач  
Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова**

*Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4215 від 22.11.2011 р.*

Україна, 65082, м. Одеса, вул. Єлісаветинська, 12  
Тел. (048) 723-28-39. E-mail: druk@onu.edu.ua