

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ НЕПЕРЕРВНОЇ ОСВІТИ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Грищенко  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)  
ВИПУСНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

**Тема: «Оптоелектронний перетворювач датчиків тиску інформаційного комплексу висотно-швидкісних параметрів на літаку»**

Виконавець студент гр. АВ-201МзСкороход Євген Анатолійович  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник д.т.н., доцент Єнчев Сергій Васильович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Консультант розділу «Охорона праці»: \_\_\_\_\_ О.О. Козлітін  
(підпис) (ПІБ)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»: \_\_\_\_\_ Л.М. Черняк  
(підпис) (ПІБ)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ В.В. Левківський  
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інститут навчально-науковий неперервної освіти  
Кафедра авіоніки  
Спеціальність 173 «Авіоніка»  
(шифр, найменування)

Освітньо-професійна програма «Комплекси пілотажно-навігаційного обладнання»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Ю.В. Грищенко  
«21» вересня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на виконання кваліфікаційної роботи**  
Скороход Євгена Анатолійовича  
(П.І.Б. випускника)

1. Тема роботи (проекту) «Оптоелектронний перетворювач датчиків тиску інформаційного комплексу висотно-швидкісних параметрів на літаку» затверджена наказом ректора від «03» жовтня 2023 р. №2024/ст.
2. Термін виконання роботи (проекту): з 02.10.2023 р. по 31.12.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи (проекту): вимірювані величини – повний та статичний тиски, тип пружного чутливого елемента – порожнистий циліндричний резонатор, гофрована мембрана; похибка 0,5% від вимірюваного діапазону.
4. Зміст пояснювальної записки: аналіз сучасних датчиків тисків у системі управління висотно-швидкісними параметрами повітряного судна. Розробка методики розрахунку пружного чутливого елемента з врахуванням функціональних можливостей вторинного перетворювача. Розробка апаратно-програмного комплексу для оцінки метрологічних характеристик датчиків тисків на основі лінійки фотоелектронних приймачів. Охорона праці. Охорона навколишнього середовища.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу:  
Функціональна схема системи управління висотно-швидкісними параметрами ПС. Структурна схема модуля тиску частотного датчика. Результати розрахунків і досліджень в ANSYS Design Modeler. Результати моделювання статичної характеристики пружних чутливих елементів. Структурна схема апаратно-програмного комплексу досліджень датчика тисків на основі лінійки фотоелектронних приймачів. Електричні схеми датчиків, блоку обробки.

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін Виконання	Підпис керівника
1.	Вивчення інформаційних джерел	02.10 – 09.10.2023	
2.	Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження	10.10 – 17.10.2023	
3.	Аналіз сучасних датчиків тисків у системі управління висотно-швидкісними параметрами повітряного судна	18.10 – 30.10.2023	
4.	Розробка методики розрахунку пружного чутливого елемента з врахуванням функціональних можливостей вторинного перетворювача	31.10 – 10.11.2023	
5.	Розробка апаратно-програмного комплексу для оцінки метрологічних характеристик датчиків тисків на основі лінійки фотоелектронних приймачів	11.11 – 23.11.2023	
6.	Розгляд питання з охорони праці	24.11 – 30.11.2023	
7.	Проведення дослідження впливу системи на навколишнє середовище	01.12 – 05.12.2023	
8.	Розробити та оформити пакет обов'язкового ілюстративного матеріалу	06.12 – 13.12.2023	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Козлітін О.О.		
Охорона навколишнього середовища	Черняк Л.М.		

8. Дата видачі завдання: «21» вересня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Єнчев С.В.  
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Скороход Є.А.  
(підпис випускника) (П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Оптоелектронний перетворювач датчиків тиску інформаційного комплексу висотно-швидкісних параметрів на літаку»: 107 с., 34 рис., 14 табл., 29 використаних джерел.

ДАТЧИК ТИСКУ, СИСТЕМА ПОВІТРЯНИХ СИГНАЛІВ, ОПТОЕЛЕКТРОННИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ВИСОТНО-ШВИДКІСНІ ПАРАМЕТРИ, ЛІНІЙКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка та дослідження нових датчиків статичного та повного тисків, що використовують оптоелектронні перетворювачі на основі ЛФП з покращеними метрологічними характеристиками, зниженими масогабаритними параметрами конструкції та зменшеним власним споживанням потужності.

Об'єкт дослідження: інформаційні системи та комплекси висотно-швидкісних параметрів.

Предмет дослідження: оптоелектронне перетворення сигналів у інформаційних системах і комплексах висотно-швидкісних параметрів.

Методи дослідження: логічні та емпіричні методи математичного дослідження на основі спостереження та досвіду, порівняння, аналізу та синтезу. Синтезуюча математична модель виконана в інтегрованому середовищі розробки Microsoft Visual Studio мовою програмування C++. Під час вирішення пружно-пластичних завдань використовувався програмний комплекс ANSYS Workbench. Розробка та налагодження програмного забезпечення мікропроцесорної техніки апаратно-програмного комплексу виконана в середовищі розробки Keil uVision мовою програмування «Сі». Автоматизація, візуалізація та статистична обробка експериментальних даних здійснювалася на базі розробленого програмного забезпечення графічною мовою програмування «G» у середовищі LabVIEW.

Матеріали роботи можуть бути використані при проектуванні інформаційних систем і комплексів висотно-швидкісних параметрів.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ І СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ .....	13
1.1. Огляд поточного стану та перспектив розвитку відновлюваної енергетики.....	12
1.2. Порівняльний аналіз способів підвищення ефективності фотоелектричних станцій .....	17
1.3. Порівняльний аналіз методів відстеження точки максимальної потужності сонячних батарей .....	22
1.4. Огляд та порівняльний аналіз методів оптимізації складу обладнання гібридних СЕП з ВДЕ.....	26
Висновки з першого розділу .....	29
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПОНЕНТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ .....	31
2.1. Обґрунтування та вибір методів дослідження .....	31
2.2. Модель сонячної батареї .....	36
2.3. Модель DC-DC перетворювача .....	41
2.4. Модель електричного навантаження DC-DC перетворювача.....	46
2.5. Модель контролера пошуку точки максимальної потужності.....	51
2.6. Загальна модель фотоелектричної станції.....	52
Висновки з другого розділу .....	54
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ АЛГОРИТМІВ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НАПРУГИ .....	55
3.1. Аналіз режимів та умов узгодження параметрів сонячної батареї з параметрами перетворювача напруги контролера максимальної потужності.....	55
3.2. Розробка методик проектування та вибору параметрів перетворювачів напруги фотоелектричних станцій.....	61

3.3. Вибір оптимальних параметрів алгоритму рою частинок для МРРТ контролерів фотоелектричних станцій .....	72
3.4. Моделювання режимів автономної фотоелектричної станції умовах рівномірного освітлення.....	80
Висновки з третього розділу .....	86
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>88</b>
4.1. Законодавча та нормативна база України про охорону праці .....	88
4.2. Небезпечні та шкідливі фактори для суб'єкта охорони праці .....	89
4.3. Розробка заходів щодо зниження небезпечних і шкідливих факторів для суб'єкта охорони праці.....	93
4.4. Пожежна і вибухова безпека .....	102
Висновки з четвертого розділу.....	104
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА.....</b>	<b>106</b>
5.1. Вплив електромагнітних джерел випромінювання на навколишнє середовище .....	106
5.2. Організаційні заходи захисту від електромагнітного забруднення .....	112
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>114</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>115</b>

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CFPSO	– PSO з використанням спеціального коефіцієнта звуження;
CRF	– capital recovery factor;
CS	– Cuckoo search;
EENS	– expected energy not supplied;
HRES	– hybrid renewable energy systems;
IC	– метод зростаючої провідності;
LCC	– life cycle cost;
LLS	– loss of load probability;
LPSP	– loss of power supply probability;
MPPT	– Maximum power point tracking;
P&O	– метод збурення та спостереження;
PSC	– умова часткового затінення (partial shading conditions);
PSO	– Particle swarm optimization;
PWM	– широтно-імпульсна модуляція (pulse width modulation);
VCPSO	– PSO зі змінними значеннями коефіцієнтів інерції та прискорення;
АБ	– акумуляторна батарея;
ВАХ	– вольт-амперні характеристики;
ВВХ	– вольт-ватні характеристики;
ВДЕ	– відновлювані джерела енергії;
ВЕУ	– вітроенергетичні установки;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
СБ	– сонячна батарея;
СЕ	– сонячний елемент;
СЕС	– сонячні електростанції;
ССМ	– режим безперервних струмів;
ФЕС	– фотоелектрична станція;
ФЕУ	– фотоелектричні установки;
ФМ	– фотоелектрична модель.

## ВСТУП

*Актуальність роботи.* Аерометричні датчики тиску систем повітряних сигналів (СПС), як елементи системи управління висотно-швидкісними параметрами повітряного судна (ПС), призначені для перетворення в електричні сигнали, що сприймаються повний  $P^*$ , і статичний тиск  $P$ , з подальшою передачею сигналів в обчислювальний пристрій з метою обчислення параметрів руху літального апарату. Параметри руху ПС мають однозначну відповідність статичному та повному тискам. Датчики тиску є датчиками первинної інформації для СПС, їх конструкції та чутливі елементи дуже різноманітні та багато в чому визначають параметри точності, а також ресурсні, геометричні та експлуатаційні характеристики СПС.

Розробкою та виробництвом датчиків аерометричних датчиків тисків займаються вітчизняні підприємства. До переліку зарубіжних компаній належать HoneywellCorp. (США), MarconiAvionics(США), Crouzet (Франція), Badin-Crouzet(Франція), Jaeger(Франція), а також багато інших.

Найбільше поширення як джерела первинної інформації систем повітряних сигналів, в даний час, отримали датчики тиску генераторного типу або частотні датчики, принцип дії яких заснований на використанні коливань ПЧЕ виконаного у вигляді циліндричного резонатора з власною частотою коливань коливань під дією вимірюваних тисків. Дані датчики мають досить високу функціональну надійність і відносно високу точність. Однак, їм притаманні недоліки, пов'язані з нелінійним спотворенням характеристики перетворення тиску в частоту, і похибками, які визначаються високою залежністю пружних властивостей резонатора від температури.

Датчики тиску на основі оптоелектронних перетворювачів, що передбачають наявність лінійок фотоелектронних приймачів (ЛФП), що дозволяють здійснювати



перетворення просторового розподілу світлового поля в електричний сигнал, набувають останніми роками широкого поширення.

Відмінною рисою, пропонованих у роботі датчиків, є наявність високочутливого вторинного перетворювача та пружного елемента з обмеженою амплітудою відхилень, що забезпечує підвищення точності вимірювання тиску і багато в чому виключає недоліки аналогів. Звідси виникає необхідність теоретичного дослідження методів математичного моделювання та експериментальних досліджень характеристик первинних та вторинних вимірювальних перетворювачів тисків.

У зв'язку з вищевикладеним, а також зважаючи на те, що дуже велика кількість аварій і катастроф повітряних суден в історії авіації стала наслідком несправностей аерометричних пристроїв, обрана тема для досліджень є дуже актуальною.

*Мета кваліфікаційної роботи* – розробка та дослідження нових датчиків статичного та повного тисків, що використовують оптоелектронні перетворювачі на основі ЛФП з покращеними метрологічними характеристиками, зниженими масогабаритними параметрами конструкції та зменшеним власним споживанням потужності.

Поставлена мета досягається вирішенням наступних завдань:

1. Розробка методики розрахунку ПЧЕ, принциповою відмінністю якої є облік технічних характеристик вторинного перетворювача, зокрема, порога чутливості вторинного перетворювача та прогину центру мембрани як функції координати пікселя ЛФП.

2. Розробка алгоритмів роботи мікроконтролера, що реалізують обробку сигналів з виходу ЛФП та забезпечують підвищення точності вимірювань деформації мембран датчика тиску, що використовує оптоелектронні перетворювачі.

3. Проведення порівняльних досліджень щодо визначення величин прогинів мембрани, отриманих аналітичним методом, з використанням програмного комплексу ANSYS, та отриманих в результаті проведених експериментів.

4. Розробка методів та алгоритмів обчислення величини деформації ПЧЕ при використанні процесу розгалуження вихідної інформації, що здійснюється застосуванням шторок з  $n$  щілинами, що дозволяє сформувати на ЛФП  $n$  оптичних плям, що переміщуються у функції вимірюваного тиску.

*Методи досліджень.* При виконанні роботи використовувалися логічні та емпіричні методи математичного дослідження на основі спостереження та досвіду, порівняння, аналізу та синтезу. Синтезуюча математична модель виконана в інтегрованому середовищі розробки Microsoft VisualStudio мовою програмування C++. Під час вирішення пружно-пластичних завдань використовувався програмний комплекс ANSYS Workbench. Розробка та налагодження програмного забезпечення мікропроцесорної техніки апаратно-програмного комплексу виконана в середовищі розробки KeiluVision мовою програмування «Сі». Автоматизація, візуалізація та статистична обробка експериментальних даних здійснювалася на базі розробленого програмного забезпечення графічною мовою програмування «G» у середовищі LabVIEW.

#### *Наукова новизна кваліфікаційної роботи*

1. Отримані та обґрунтовані рекомендації для побудови конструктивних схем датчиків тисків на базі оптоелектронних перетворювачів, які відрізняються наявністю високочутливого вторинного перетворювача та пружної мембрани з мінімізованою деформацією, а також пристрої управління деформаціями, заснованого на законах магнітного тяжіння, що забезпечують підвищення точності.

2. Вперше розроблені математичні моделі взаємозв'язків порогу чутливості вторинного перетворювача з процедурами обробки інформаційних даних, одержуваних при деформації ПЧЕ, спричинених зміною статичного та повного

тисків, які відрізняються тим, що в них враховується крок дискретизації вторинного перетворювача.

3. Запропоновано алгоритми роботи мікроконтролера, які забезпечують при вимірюванні лінійних переміщень жорстких центрів мембран обробку сигналів з виходу ЛФП при впливі на нього однієї світлової плями, що відрізняються тим, що при опитуванні ЛФП АЦП здійснює подвійне перетворення, що забезпечує більш високу точність виміру переміщення жорсткого центру мембрани.

4. Запропоновано алгоритми роботи мікроконтролера, які забезпечують обробку сигналів з виходу ЛФП при впливі на неї двох оптичних плям, причому процес математичної обробки отриманих даних виконується до завершення повного циклу опитування, що забезпечує більш високу точність вимірювань переміщення жорсткого центру мембрани, а також підвищення швидкодії вимірювальної системи

5. Запропоновано метод та алгоритм обробки вихідної інформації, які здійснюються застосуванням шторок з  $n$  щілинами та дають можливість сформувати на ЛФП  $n$  оптичних плям, що переміщуються у функції вимірюваного тиску, що дозволяє за один період опитування лінійки отримати  $n$  незалежних значень вимірюваного тиску та, середня результат, підвищити точність вимірювання, а також звести до мінімуму вплив зовнішніх збурювальних факторів, зокрема, вібрацій.

#### *Практичне значення роботи.*

1. Розроблена методика математичного моделювання статичної характеристики ПЧЕ, яка враховує функціональні можливості вторинного перетворювача та закономірність зміни статичного та повного тисків, може бути використана при оцінці точнісних характеристик датчиків тисків на етапах попереднього проектування ПЧЕ.

2. Розроблені алгоритми роботи мікроконтролера забезпечують обробку вихідних сигналів ЛФП при вимірюванні лінійних переміщень жорсткого центру

ПЧЕ і можуть бути використані при розробці аналогічних вимірювальних систем лінійних переміщень.

3. Розроблені нові високоточні датчики статичного та повного тисків, що використовують оптоелектронні перетворювачі інформації на основі ЛФП як вторинні перетворювачі, мають цифровий вихід і підключаються до обчислювального пристрою СПС без додаткових перетворювачів.

4. Розроблені метод і алгоритм використання процесу розгалуження вихідної інформації дозволяють за один період опитування лінійки отримати  $n$  незалежних значень вимірюваного тиску  $i$ , усереднивши результат, підвищити точність вимірювання, а також звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів, що обурюють, зокрема, вібрацій.

5. Запропоновані в роботі способи управління сприйняттям статичного та повного тисків, які дозволяють підвищити точність вимірювань за рахунок використання високочутливого вторинного перетворювача, а також зміни жорсткості пружного елемента або варіації сил магнітного тяжіння можуть бути використані в широкому спектрі датчиків тисків.

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКІВ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ВИСОТНО-ШВИДКІСНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

### 1.1. Система управління висотно-швидкісними параметрами ПС

Система управління висотно-швидкісними параметрами повітряного судна є сукупністю керуючих поверхонь і відповідних пристроїв і механізмів, зокрема, механічних, гідравлічних, електричних та електронно-обчислювальних, що забезпечують вибір і підтримання висоти, горизонтальної та вертикальної швидкостей польоту в неавтоматичному, напівавтоматичному, автоматичному та комбінованому режимах управління.

У загальному випадку система управління висотно-швидкісними параметрами включає систему повітряних сигналів (СПС) (рис. 1.1.), пілотажний комплекс повітряного судна, виконавчі пристрої системи управління, засоби відображення інформації та органи управління повітряним судном за допомогою яких видається керуючий вплив на виконавчі пристрої системи керування. Крім того, пілот здійснює вибір режиму управління висотно-швидкісними параметрами з використанням органів управління пілотажного комплексу, зокрема режими стабілізації висоти польоту, стабілізації швидкості польоту, стабілізації вертикальної швидкості польоту, автоматизований вихід на задану висоту, автоматизований розгін або гальмування до заданої швидкості польоту і т.д. Слід зазначити наявність режимів управління, при яких пілотажний комплекс здійснює вироблення команд директорного управління, при цьому пілотажний комплекс не бере участі в управлінні повітряним судном (або його участь обмежено), а лише формує команди для пілота.



Рис. 1.1. Функціональна схема системи управління висотно-швидкісними параметрами ПС:  $P$  - статичний тиск,  $P^*$  - повний тиск,  $T^*$  - температура загальмованого потоку;  $\alpha, \beta$  - аеродинамічні кути,  $V_{np}$  - приладова швидкість,  $V_{icm}$  - істинна швидкість,  $V_y$  - вертикальна швидкість,  $H_{бар}$  - барометрична висота, ПСТ - приймач статичного тиску, ППТ - приймач повного тиску, ДТ - датчик температури, ДАК - датчик аеродинамічних кутів, ЦСПС - цифрова система повітряних сигналів, КВ - керуючий вплив

Безпечне виконання польоту залежить від функціональної надійності елементів та пристроїв системи управління висотно-швидкісними параметрами повітряного судна, зокрема роботи СПС та його джерел первинної інформації.

Як джерела первинних інформації про висотно-швидкісні параметри повітряного судна використовуються датчики статичного і повного тисків, що включають первинні і вторинні вимірювальні перетворювачі тисків.

Сучасні датчики статичного та повного тисків входять до складу СПС, призначеної [1] для обчислення висотно-швидкісних параметрів польоту ПС. СПС

[2] складається (рис. 1.1) з обчислювача повітряних сигналів, на входи якого подається наступна інформація:  $P^*$  – повний тиск,  $P$  – статичний тиск,  $T^*$  – температура загальмованого потоку зовнішнього повітря,  $\alpha$ ,  $\beta$  – аеродинамічні кути,  $P_{QFE}$ ,  $P_{QNH}$ ,  $P_{STD}$  – рівні тисків, що виставляються вручну екіпажем.

Датчики повного та статичного тисків є джерелами первинної інформації [5] у СПС, що визначає суттєву залежність метрологічних характеристик СПС від точності вимірювання статичного та повного тисків (при впливі дестабілізуючих факторів) та від збереження заданої точності в часі.

Діапазон виміру та вимоги [2] до точності вимірювання висотно-швидкісних параметрів повітряного судна представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Похибки вимірів СПС сучасних ЛА

Параметр	Діапазон вимірювання	Похибка		Поріг чутливості
		Значення	Діапазон	
Абсолютна висота, м	від мінус 500 до 15240	$\pm 4,6$	-503	0,3
		$\pm 6,1$	3048	
		$\pm 12,2$	9144	
		$\pm 24,4$	15240	
Відносна висота, м	від мінус 500 до 15240	$\pm 6,1$	від мінус 500 до 3048	0,3
		$\pm 12,2$	9144	
		$\pm 24,4$	15240	
Вертикальна швидкість, м/с	$\pm 102$	$\pm 0,15$	$\pm 102$	0,07
Приладова швидкість, км/год	від 55,5 до 832	$\pm 9,3$	111	0,115
		$\pm 3,7$	185	
		$\pm 1,85$	832	
Справжня швидкість	від 185 до 1108	$\pm 7,4$	від 185 до 1108	0,115

(повітряна) км/год				
--------------------	--	--	--	--

Із зарубіжних конструкцій СПС можна виділити GDS 74A, що входить до складу бортового радіоелектронного комплексу GARMIN G 1000, що встановлюється на літаки DA-40, DA-42 і Cessna. Крім того, розроблений аналог СПС входить до складу бортового радіоелектронного обладнання літаків Ан-148, Ан-158. Як джерело інформації про параметри статичного та повного тисків повітряного потоку використовуються, як і в попередньому випадку, датчики генераторного типу (вони частотні датчики тисків).

Порівняльна оцінка датчиків тисків за критеріями: похибка вимірювання тиску, час готовності до роботи та напруга живлення представлена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняльна оцінка датчиків тиску СПС.

Тип СПС (найменування ДДГ)	Похибка від діапазону вимірюваного тиску, %	Час готовності, с	Напруга живлення, В
СПС-2Ц, СПС-85, СПС-96 (ДДГ2)	0,03 - 0,04	не більше 30	15 та 5
GDS 74A	0,03 - 0,08	не більше 120	15

Бортове радіоелектронне обладнання (БРЕО) сучасних ПС, що розробляється в даний час, пред'являє більш жорсткі вимоги до технічних характеристик складових елементів СПС і, зокрема, до технічних характеристик датчиків первинної інформації. До стандартних вимог належать: висока надійність, точність вимірювань, динамічна стійкість, мінімальне енергоспоживання, малі габарити та маса. До вимог сучасних систем додаються наявність цифрових інтерфейсів міжмодульної інформаційної взаємодії та висока швидкодія.

Слід зазначити і швидкі темпи розвитку інтегрованих систем резервних приладів (ІСРП), які витісняють резервну групу аналогових індикаторів висотно-



швидкісних параметрів [3]. Особливістю ІСРП є інтеграція в єдиний блок датчиків первинної інформації, обчислювача, індикатора та автономного джерела живлення, що забезпечує автономну роботу ІСРП на часовому інтервалі не менше 30 хвилин, при відмові основної групи приладів та систем. Це, у свою чергу, вимагає від датчиків первинної інформації, зокрема, від датчиків статичного та повного тиску, забезпечення компактності та малого споживання електроенергії.

## 1.2. Аналіз частотних датчиків тиску

Проведений нами аналіз датчиків тисків, що експлуатуються в даний час у складі СПС, дозволив встановити, що датчики тиску генераторного типу на основі частотного методу перетворення інформації є одними з найпоширеніших в авіації.

Частотні перетворювачі, що використовуються на борту ПС, здійснюють перетворення коливань ПЧЕ (циліндричного резонатора) частоту проходження імпульсів. Даний метод перетворення інформації має відносно високу завадостійкість. Повний та статичний тиск в цифрових СПС вимірюється генераторними або частотними датчиками тисків (Рис. 1.2.).

У роботі [4] представлено опис принципу дії датчиків, заснованих на використанні коливань ПЧЕ (механічного резонатора), частота коливань якого змінюється під дією вимірюваних тисків. ПЧЕ є тонкостінним циліндричним резонатором, завареним у корпус (рис. 1.3.) [3].

Опорний тиск (або вакуум) утворений між внутрішньою стінкою корпусу та зовнішньою стінкою ПЧЕ (резонатора). Зміна тиску у внутрішній порожнині ПЧЕ (резонатора) сприяє зміні його жорсткості  $i$ , отже, зміні частоти коливань  $f$ :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Eb\delta^3}{m \cdot l^3} \left[ 1 + 0,015 \cdot \left( \frac{bP}{\delta E} \right)^2 \right]}, \quad (1.1)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу, з якого виготовлений циліндр,  $m$  – його наведена маса,  $\delta$  – товщина стінки циліндра,  $l$  – висота циліндра,  $b$  – діаметр циліндра,  $P$  – тиск.

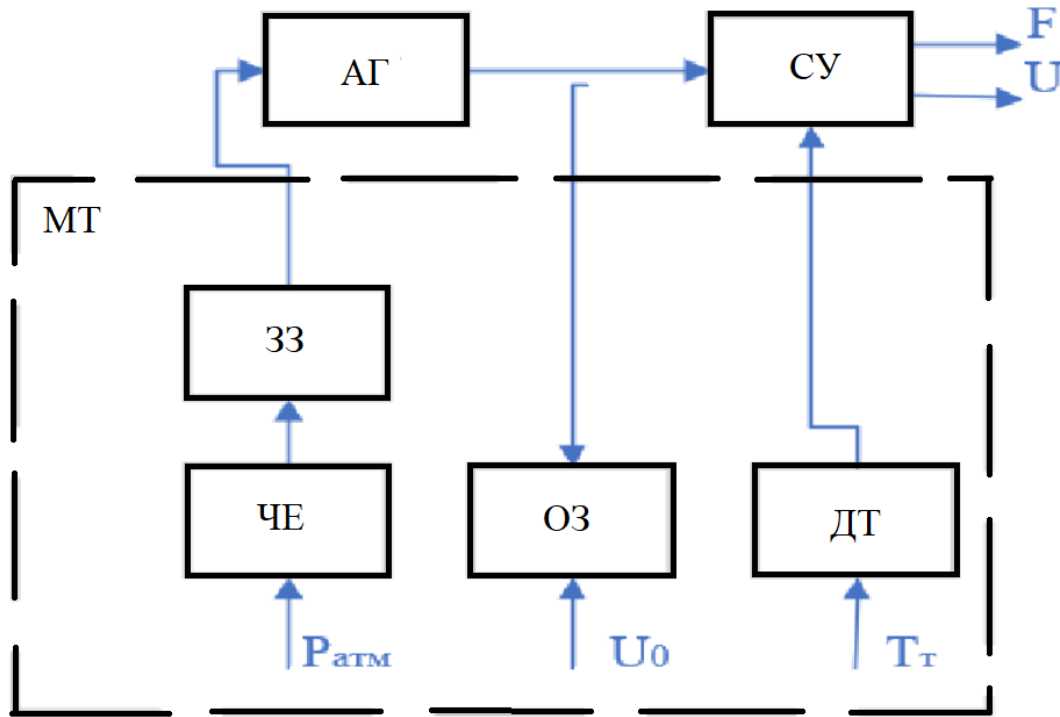


Рис. 1.2. Структурна схема модуля тиску частотного датчика: АГ – автогенератор, ДТ – датчик температури  $T_T$ , МТ – модуль тиску, ОЗ – обмотка збудження, ЗЗ – обмотка зворотного зв'язку, СУ – схема узгодження, ЧЕ – чутливий елемент.

ПЧЕ є тонкостінним циліндричним резонатором, завареним у корпус (рис. 1.3.) [3].

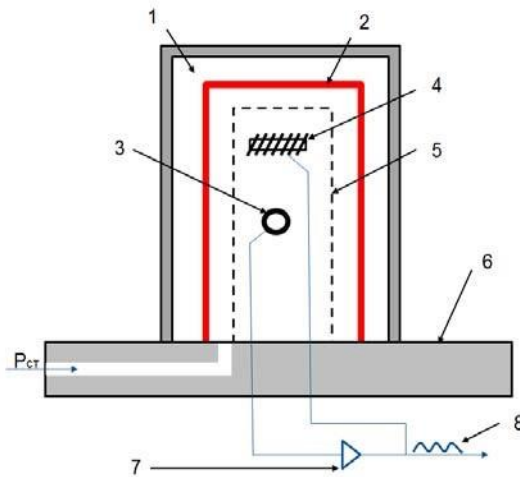


Рис. 1.3. Принципова схема датчика тиску генераторного типу: 1 – опорний тиск (вакуум), 2 – ПЧЕ (резонатор), 3 – обмотка знімання сигналу, 4 – обмотка збудження, 5 – елементи системи самозбудження, 6 – корпус, 7 – підсилювач, 8 – вихідний сигнал

Порушення та підтримка коливань ПЧЕ (резонатора) забезпечується за допомогою двох електромагнітних обмоток збудження. Схема автогенератора із зворотним зв'язком забезпечує коливання ПЧЕ (резонатора) на частоті власного резонансу. Для врахування залежності властивостей ПЧЕ від температури у схемі датчика встановлено датчик температури.

На входи обчислювача надходять сигнали з датчика тисків у вигляді частоти проходження імпульсів напруги  $f$ , пропорційних вимірюваному тиску, а також сигнал від датчика температури у вигляді напруги постійного струму.

Обчислювач здійснює управління та обробку сигналів всіх елементів та пристроїв каналу вимірювання статичного тиску та реалізує алгоритми обчислення поточної висоти  $H_{\text{відн}}$ ,  $H_{\text{абс}}$ ,  $H_{\text{еш}}$ . Крім того, обчислювач забезпечує автоматичне коригування аерометричних поправок сигналів  $H_{\text{абс}}$  та  $H_{\text{відн}}$ . На виході обчислювача цифрові сигнали, що використовуються для передачі відомостей про висотно-швидкісні параметри системи управління, сигналізації та індикації екіпажу.

Технологічний процес виготовлення резонатора складається з низки спеціальних операцій на унікальному устаткуванні, яким володіють деякі фірми. Наведена вище формула (1.1) до розрахунку власних коливань резонатора є наближеною, але в практиці використовують емпіричні вирази.

З середини минулого століття датчиками статичного та повного тиску займається англійська фірма Солатрон (Solatron), яка в даний час розробила та виробляє зазначені датчики для СПС військових та цивільних літаків.

Однак, частотні датчики мають низку істотних недоліків, з яких виділимо температурну похибку, нелінійні спотворення та відносно високе енергоспоживання.

Датчики тисків генераторного типу або частотні мають суттєві похибки, викликані зміною температури, і становлять до 7% вимірюваного діапазону тисків.

Для обліку та компенсації температурних похибок датчиків тиску генераторного типу використовуються поправки, значення яких обчислюються залежно від температури ПЧЕ вимірюваної датчиком температури.

Крім того, даним датчикам властиві недоліки, пов'язані з «перескоком частоти». Подібне явище проявляється при переході через критичні значення (точки) тисків, що супроводжуються стрибкоподібною зміною вихідного сигналу тиску.

Автоколивальна система змінює частоту коливань із частоти, що відповідає першому максимуму на частоту, що відповідає другому максимуму (рис. 1.4. та рис. 1.5.) [2], при переході через точку перескоку.

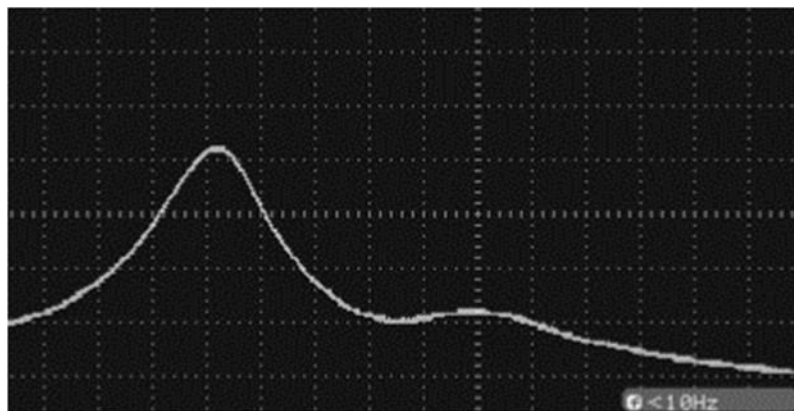


Рис. 1.4. АЧХ перетворювача тиску нижче точки перескоку частоти

Похибка вимірювань при прояві «перекосу частоти» може досягати значень кілька відсотків. Слід виділити проблеми, пов'язані з розробкою та виробництвом ПЧЕ у вигляді циліндричних резонаторів, зокрема через малі значення товщини стінки резонаторів (20 мкм), визначення товщини резонаторів контактним методом практично неможливо. Крім того, потрібно вдосконалювати технологію витяжки ПЧЕ та методи контролю їх геометричних параметрів.

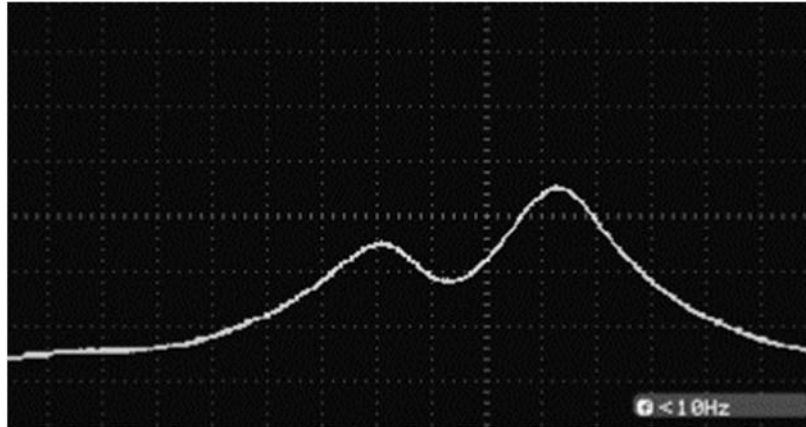


Рис. 1.5. АЧХ перетворювача тиску вище за точку перескоку частоти

Істотні недоліки має і технологія виготовлення ПЧЕ у вигляді циліндричних резонаторів, зокрема їхній брак у процесі виробництва становить близько 70%.

Зважаючи на популярність датчиків тисків, заснованих на частотному методі перетворення інформації, ведуться дослідження та розробки, спрямовані на модернізацію та покращення даного методу [1, 3, 8].

### **1.3. Аналіз конструктивного вигляду первинних перетворювачів тисків**

Поряд з ПЧЕ, виконаних у формі циліндричних резонаторів, існує достатньо великий клас ПЧЕ на основі плоских або гофрованих мембран.

Гофровані мембранні ПЧЕ набули найбільшого поширення [4], оскільки здатні набувати значного пружного прогину під дією тиску в межах пружних властивостей.

Найбільш поширені геометричні профілі гофрованих мембран представлені на рис. 1.6.

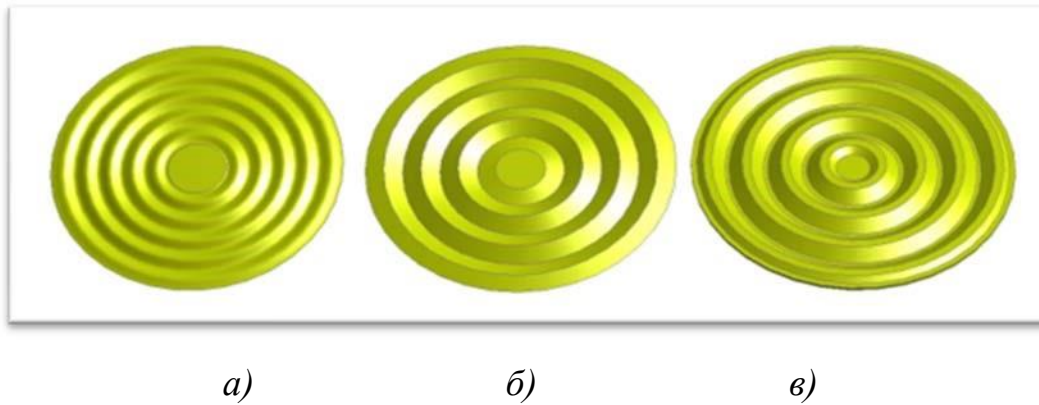


Рис. 1.6.Гофровані мембрани:а – синусоїдальна, б – пильчаста, в – трапецеїдальна.

У приладобудуванні застосовуються поодинокі мембрани, мембранні коробки (рис.1.7), які, своєю чергою, можуть з'єднуватися в блоки.

Датчики тиску на основі мембранних ПЧЕ менш чутливі до вібрацій та пульсацій вимірюваного середовища, застосовні при відповідному захисті мембрани для вимірювання тиску агресивних середовищ.

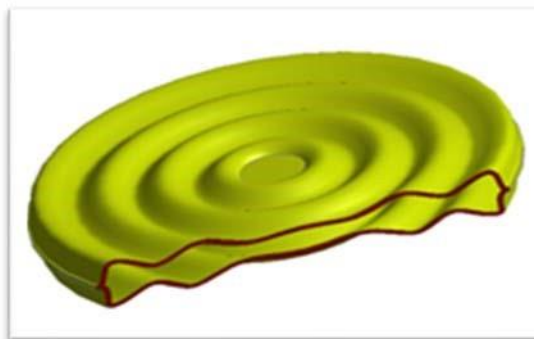


Рис. 1.7.Мембранні коробки

У роботах [8, 10] виконано досить докладний огляд марок та властивостей матеріалів, які застосовуються для виготовлення в ПЧЕ.

Для виготовлення мембранних ПЧЕ переважно використовуються дисперсійно-твердні сплави, що мають низькі значення пружних недосконалостей. Крім того, вони мають незалежність їх модуля пружності від температури навколишнього середовища і, після впливу вібрації, високими пружними і властивостями міцності, високою релаксаційною стійкістю. До цих сплавів відносяться [3, 9] берилієві

бронзи БрБ2, БрБНТ 1,9 і БрБНТ 1,7, що перевершують багато високоякісних сталі за міцністю та пружними властивостями.

Гістерезис пружних елементів з берилієвої бронзи відносно малий порівняно з іншими матеріалами, які використовуються в датчиках тиску в якості ПЧЕ, і становить приблизно 0,4-1%. Основну частку значних недоліків застосування мембранних ПЧЕ у складі датчиків повного та статичного тисків можна поділити на дві групи.

Перша група недоліків, пов'язана з контактним впливом ПЧЕ та вторинного перетворювача тиску: тертя між елементами ПЧЕ та вторинного перетворювача, вимірювальне зусилля на ПЧЕ з боку елементів вторинного перетворювача. Крім того, до цієї групи можна віднести розмір жорсткого центру мембранного ПЧЕ.

Друга група недоліків, пов'язана з величиною еквівалентної напруги: залишкові деформації, пружний наслідок, пружний гістерезис, втомне руйнування ПЧЕ.

Перераховані вище недоліки проявляються таким чином: у вигляді відхилення щодо встановленого нульового значення; гістерезисних явищ; руйнувань місць контактного впливу між первинним та вторинним вимірювальними перетворювачами тисків. Руйнування місць контактної взаємодії між перетворювачами особливо гостро проявляється при застосуванні датчиків ПЧЕ на основі структур «кремній на сапфірі».

Вплив гістерезисних явищ може спричинити спотворення у показаннях барометричних висотомірів [8]. Так, при відносно швидкому наборі та зниженні ПС покази приладів на одній і тій же висоті можуть виявитися різними (рис. 1.8.).

І перша і друга групи недоліків пов'язана з конструктивним виконанням і функціональними можливостями вторинного перетворювача тисків.

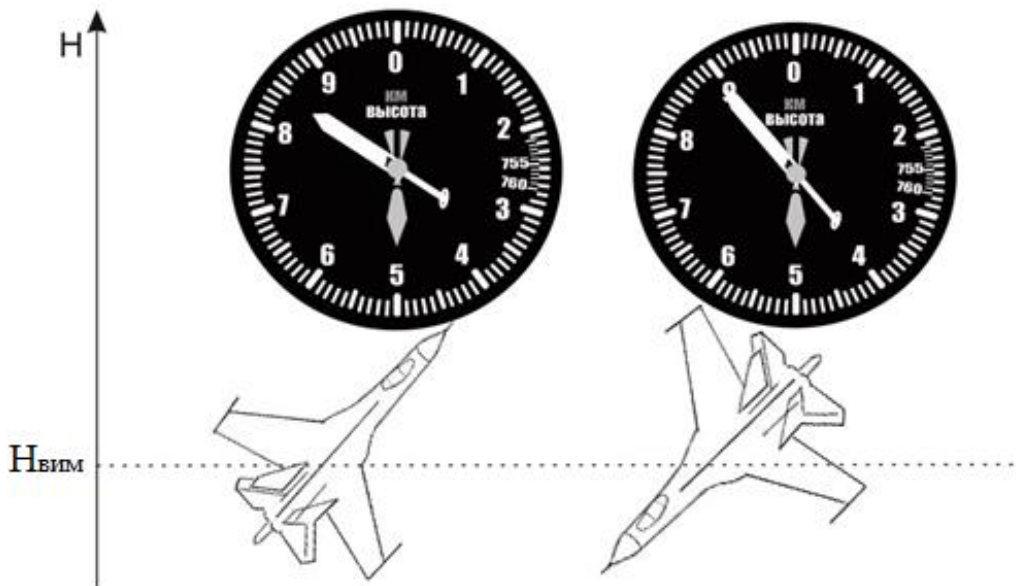


Рис. 1.8.Прояв гістерезисних явищ

Перша група недоліків усувається застосуванням безконтактних методів перетворення деформації ПЧЕ на аналоговий чи цифровий сигнал.

Друга група недоліків може бути вирішена не тільки за рахунок спеціальних технологічних операцій при виготовленні ПЧЕ, але й мінімізацією еквівалентних напруг за рахунок застосування високочутливих вторинних перетворювачів тиску.

Нелінійність статичної характеристики мембранних ПЧЕ (на відміну сільфонів, трубчастих пружин) визначила їх масове застосування як первинних вимірювальних перетворювачів тисків у складі механічних та електричних приладів для індикації висотно-швидкісних параметрів екіпажу ПС. Зумовлено це тим, що закономірність зміни статичного та повного тисків залежно від висотно-швидкісних параметрів ПС носить нелінійний характер. При цьому нелінійність характеристики мембранних ПЧЕ та нелінійність зміни градієнта вимірюваних тисків за висотою протилежні, що дозволяє отримати близький до лінійного вихідний сигнал датчика.



#### 1.4. Визначення характеристики чутливого пружного елемента для датчика статичного тиску

Ефективність роботи ПЧЕ датчиків статичного тиску багато в чому визначається реалізованою статичною характеристикою [3], у запропонованому варіанті - ПЗЗ-лінійної на виході при нелінійній зміні тиску на вході.

Визначення значення перепаду тисків, необхідного для здійснення деформації в заданих межах ПЧЕ для датчика статичного тиску за відомою закономірністю зміни тиску  $P_H$  по висоті польоту:

$$P_H = P_0 \left( 1 - \frac{\tau H}{T_0} \right)^{\frac{1}{\tau R}}, \quad (1.2)$$

де  $P_0$  – тиск на нульовій висоті,  $T_0$  – температура на нульовій висоті,  $\tau$  – температурний градієнт,  $R$  – газова постійна,  $H$  – поточна висота.

Максимальний прогин мембрани  $\omega_{0max}$  досягається при  $H_{min}$ , мінімальний-  $\omega_{0min}$  при  $H_{max}$ . Припускаючи, що характеристика пружного чутливого елемента лінійна по висоті, отримано рівняння прямої, що проходить через дві точки з координатами  $(\omega_{0max}, H_{min})$  і  $(\omega_{0min}, H_{max})$ :

$$H = \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(H_{max} - H_{min})}{(\omega_{min} - \omega_{0max})} + H_{min}, \quad (1.3)$$

де  $\omega_0$ - прогин пружного чутливого елемента на висоті  $H$ . Пружний елемент деформується за рахунок перепаду тисків  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P_H - P_{вак}, \quad (1.4)$$

де  $P_{вак}$  - опорний тиск або тиск вакууму.

Перетворивши (1.2) і (1.3) на (1.4), отримано значення перепаду тисків, необхідного для здійснення деформації в заданих межах пружного чутливого елемента для датчика статичного тиску:

$$\Delta P = P_0 \left[ 1 - \frac{\tau \left( \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(H_{max} - H_{min})}{(\omega_{min} - \omega_{0max})} + H_{min} \right)}{T_0} \right]^{\frac{1}{\tau R}} - P_{вак}. \quad (1.5)$$

Максимальне значення деформації мембрани  $\omega_{0max}$  визначається як геометричними розмірами пружного чутливого елемента, і технічними можливостями вторинного перетворювача.

На рис. 1.9 представлено потрібну характеристику мембранного ПЧЕ елемента, отриману на підставі вищевикладеного методу[4].

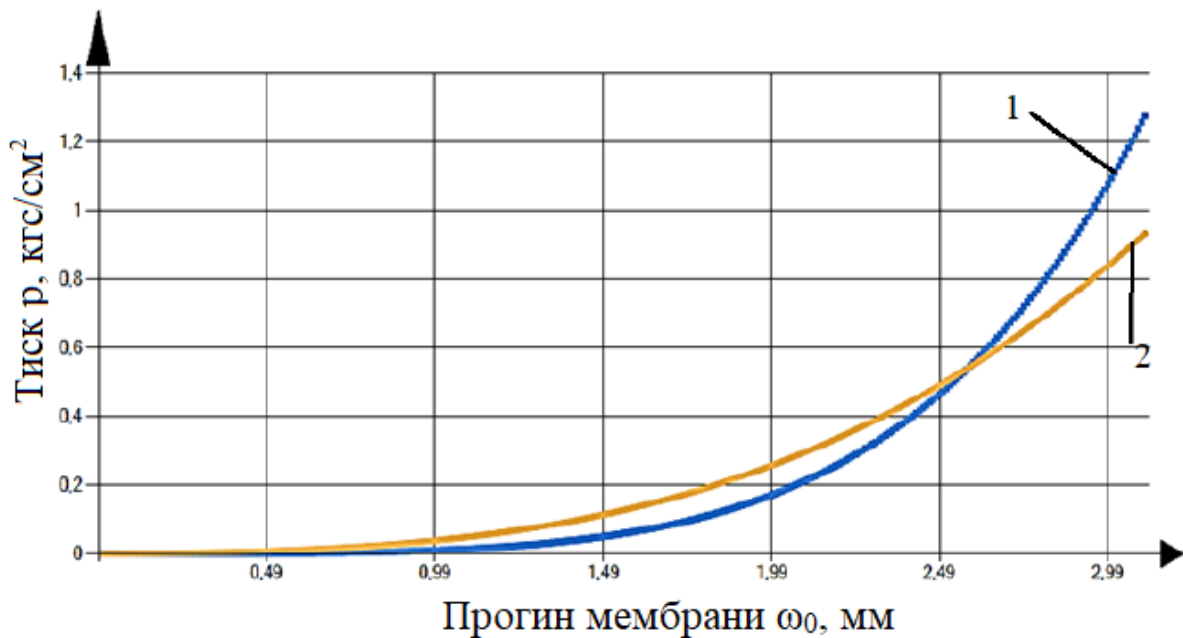


Рис. 1.9. Статична характеристика мембранного ПЧЕ для датчика статичного тиску: 1 – потрібна; 2 – розрахункова

Таким чином, наведені вище характеристики дозволяють обґрунтувати визначення потрібної характеристики ПЧЕ датчика статичного тиску, що забезпечує лінеаризацію вихідного сигналу датчика.

## 1.5. Визначення характеристики чутливого пружного елемента для датчика повного тиску

Аналогічно [9] визначення значення перепаду тисків, необхідного для здійснення деформації в заданих межах пружного чутливого елемента для датчика повного тиску, здійснюється за відомою закономірності зміни тиску  $P^*$  від швидкості польоту:

$$P^* = P_H + \frac{\rho c^2}{2}, \quad (1.6)$$

де  $P_H$  – статичний тиск,  $c$  – поточна швидкість,  $\rho$  – щільність повітря.

Очевидно, що повний тиск зі збільшенням швидкості збільшується, при цьому максимальний прогин мембрани  $\omega_{0max}$  досягається при  $c_{max}$ , а мінімальний прогин  $\omega_{0min}$  при  $c_{min}$ . Припускаючи, що характеристика пружного чутливого елемента лінійна за швидкістю, отримано рівняння прямої, що проходить через дві точки з координатами  $(\omega_{0max}, c_{max})$  і  $(\omega_{0min}, c_{min})$ .

$$c = \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(c_{min} - c_{max})}{(\omega_{min} - \omega_{0max})} + c_{max}, \quad (1.7)$$

де  $\omega_0$  – прогин пружного чутливого елемента при швидкості  $c$ .

Пружний чутливий елемент деформує за рахунок перепаду тисків, що утворився  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P^* - P_{оп}, \quad (1.8)$$

де  $P_{оп}$  – опорний тиск.

Для вимірювання повного тиску в якості опорного тиску аерометричних пристроїв використовується статичний тиск  $P_H$ , тому вираз (1.8) набуває вигляду:

$$\Delta P = P^* - P_H. \quad (1.9)$$

Перетворивши (1.6), (1.7) і (1.8) на (1.9), отримано значення перепаду тисків, необхідного для здійснення деформації в заданих межах пружного чутливого елемента для датчика повного тиску:

$$\Delta P = \frac{\rho \left[ \frac{(\omega_0 - \omega_{0max})(c_{min} - c_{max})}{(\omega_{min} - \omega_{0max})} + c_{max} \right]^2}{2}. \quad (1.10)$$

Таким чином, представлені розрахунки дозволяють визначати характеристики пружного елемента повного тиску датчика, відштовхуючись від чутливості вторинного датчика.

Таким чином, наведені вище характеристики дозволяють обґрунтувати визначення потрібної характеристики ПЧЕ датчика повного тиску, що забезпечує лінеаризацію вихідного сигналу датчика.

## **1.6. Аналіз конструктивного вигляду вторинних вимірювальних перетворювачів тисків**

Перелік методів [3, 4, 6], що забезпечують перетворення інформації від первинних вимірювальних перетворювачів тисків, включає перетворювачі: механічні, трансформаторні, тензометричні, п'єзорезисторні, ємнісні, індукційні, іонізаційні, оптичні та резонансні (частотні) [7].

З обраної концепції, далі розглядаються можливі варіанти реалізації вторинних перетворювачів тисків з урахуванням безконтактного знімання сигналу від первинного вимірювального перетворювача тисків.

Як згадувалося раніше, частотний метод (резонансний) перетворення інформації набув найбільшого поширення у складі датчиків тисків, що використовуються в сучасних СПС. Основні недоліки даних датчиків представлені вище. Однак, слід додати з огляду на те, що для вимірювання частоти коливань резонатора

використовується індуктивний або ємнісний методи, частотному методу притаманні недоліки зазначених методів.

На сучасному етапі розвитку сучасної мікропроцесорної та обчислювальної техніки з'являється можливість застосування високотехнологічних рішень, зокрема, що отримує останніми роками широке поширення, оптоелектронні перетворювачі на основі багатоелементних фотоелектронних приймачів.

Конструктивно, пристрої на базі фотоелектронних приймачів [8] виконані наступним чином, в лінійках фотоелектронних приймачів (ЛФП) окремі фоточутливі елементи (пікселі) розташовані вздовж однієї координати (рис. 1.10, а), а в матрицях фотоелектронних приймачів (МФП) пікселі рівномірно заповнюють прямокутне поле (рис. 1.10, б).

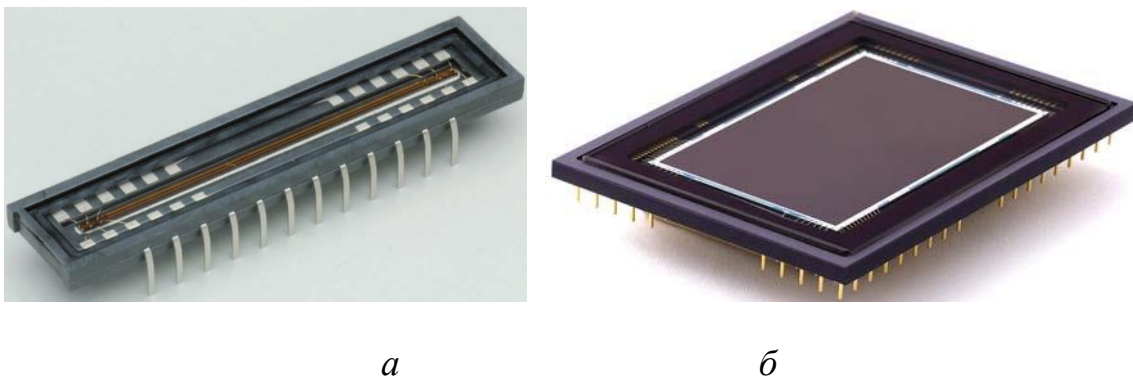


Рис. 1.10. Фотоприймачі: а – ЛФП, б – МФП.

Принцип роботи даних пристроїв полягає у формуванні всередині кожного пікселя електричного сигналу, пропорційного поглиненої ним оптичної енергії.

Досягається це завдяки фоточутливому р-п переходу (як і звичайному фотодіоду), через який відбувається розряд конденсатора фотоприймального елемента. Чим інтенсивніше буде оптична потужність, що потрапляє на піксель, тим більше буде струм, що протікає по фотодіоду, і швидше розряджається конденсатор. Наприкінці циклу виміру відбувається зчитування залишкового заряду конденсаторів пікселів. При послідовному опитуванні пікселів на виході ЛФП (або

МФП) формуватиметься електричний сигнал, у якого зміна амплітуди у часі відображає розподіл оптичної потужності у просторі фотоприймального пристрою.

Пристрої, з урахуванням фотоелектронних приймачів знайшли досить широкий спектр застосування як виміру. Їх використовують визначення кутового становища джерела випромінювання[5], в спектрометрії[4], щодо положення об'єктів[10] тощо. Ведуться роботи щодо покращення алгоритмів управління та обробки сигналів даних пристроїв.

До основного недоліку даного методу відносять необхідність інтеграції мікроконтролера до складу датчика тиску для управління та обробки вихідного сигналу фотоелектронного пристрою. Цей недолік, у свою чергу, є і перевагою даного методу, оскільки взаємодія між компонентами бортового радіоелектронного обладнання сучасних ПС реалізована за допомогою цифрових протоколів інформаційної взаємодії.

Таким чином, датчики статичного та повного тисків, реалізовані на базі ПЧЕ та ПЗЗ-лінійок, мають високі метрологічні характеристики, малим власним споживанням потужності, малими габаритами та масою.

Сказане, визначає перспективність розробки та вдосконалення датчиків тиску на основі ПЗЗ-лінійок у напрямку підвищення точності та покращення експлуатаційних характеристик.

### **1.7. Методи вимірювання з використанням фотоелектронних лінійок**

У роботі [8] представлені методи визначення положення об'єкта з використанням ЛФП та МФП. Дані методи дозволяють визначити положення об'єкта по тіні, що проектується.

Метод обмежений габаритними розмірами ЛФП та його реалізації необхідна опорна точка для звіту і, зазвичай, це перший робочий піксель ЛФП.

Встановлено вплив положення джерела оптичного випромінювання на співвідношення між положенням краю об'єкта, що вимірюється, і положенням краю в профілі освітленості на ЛФП.

Перший метод має на увазі використання джерела оптичного випромінювання з паралельним розповсюдженням променів. Подібне досягається або використанням лінзи, що колімує (рис. 1.11), або розміщенням джерела оптичного випромінювання на теоретично нескінченній відстані від ЛФП. У цьому випадку положення кромки об'єкта та його проекція на ЛФП перпендикулярні до вектора оптичного променя.

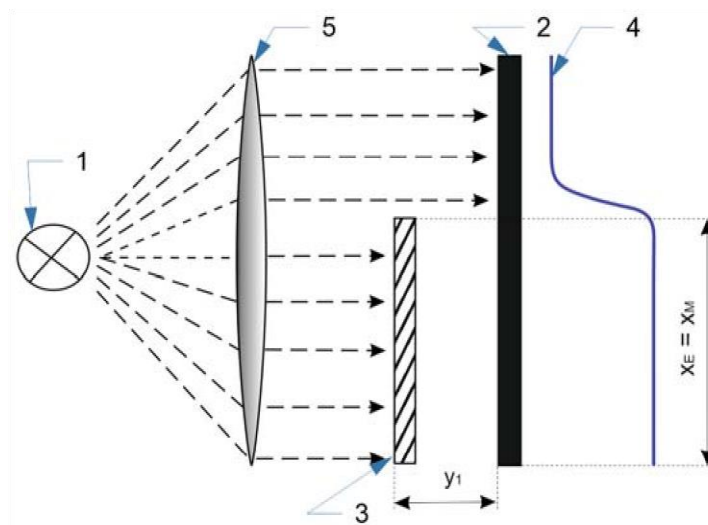


Рис. 1.11. Вимірювання положення кромки за допомогою джерела паралельних променів: 1 – джерело оптичного випромінювання, 2 – ЛФП, 3 – об'єкт, 4 – освітленість, 5 – спрямовуюча лінза.

Другий метод вводить, для спрощення вимірювань, точкове джерело оптичного випромінювання, розташоване на кінцевій відстані від ЛФП.

Подібне розташування джерела оптичного випромінювання призводить до ускладнення алгоритмів обробки результатів вимірювань, у результаті зміщення між краєм об'єкта та краєм профілю освітленості ЛФП (рис. 1.12).

У першому методі представлений алгоритм розрахунку положення об'єкта за інтенсивністю оптичного випромінювання із застосуванням колімуючої лінзи.

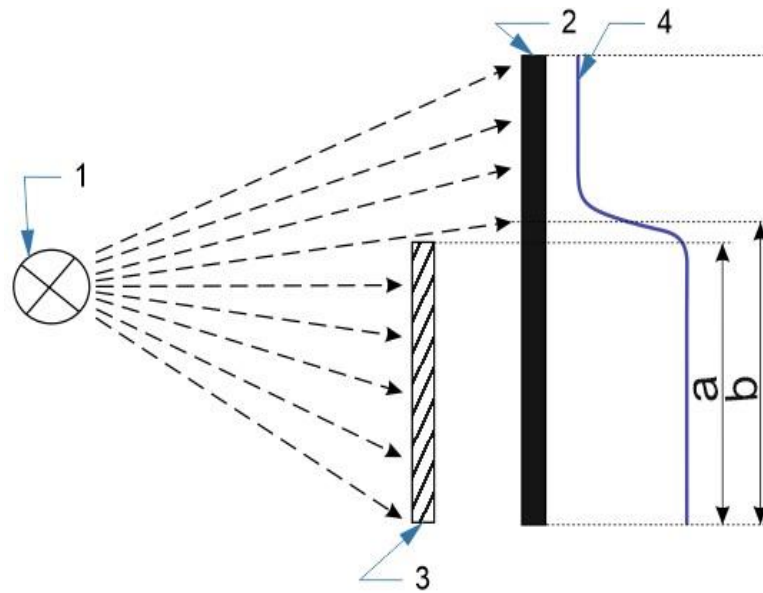


Рис. 1.12. Принцип вимірювання за допомогою тіні, що проектується на ЛФП:  
 1 – джерело оптичного випромінювання, 2 – ЛФП, 3 – об'єкт, 4 – освітленість, а –  
 становище об'єкта, b – становище тіні

Оскільки кромки об'єкта та його проекція на ЛФП перпендикулярні вектору оптичного променя, положення краю у профілі освітленості ( $x_M$ ) у цьому випадку дорівнює положенню краю об'єкта, що вимірюється ( $x_E$ ):

$$x_E = x_M, \quad (1.11)$$

Інтенсивність оптичного випромінювання на ЛФП визначається за такою формулою:

$$I = \left| \frac{I_0}{2} C \left( -\sqrt{\frac{2}{\lambda y_1}} x \right) - i S \left( -\sqrt{\frac{2}{\lambda y_1}} x \right) + \frac{1}{2} (1 - i) \right|^2, \quad (1.12)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі оптичного випромінювання;  $y_1$  - відстань між вимірюваним об'єктом та ЛФП;  $C(\alpha)$  та  $S(\alpha)$  - інтеграли Френеля.

Аналіз виразу (1.12) показує, що інтенсивність оптичного випромінювання в положенні краю об'єкта, що вимірюється ( $x = 0$ ) дорівнює  $0.25I_0$ .

Порівняльний аналіз вихідного сигналу ЛФП з граничним рівнем, встановленим на 25%, дозволяє визначити положення краю кромки об'єкта.



У другому методі застосовується точкове джерело оптичного випромінювання, яке розташовується на кінцевій відстані від об'єкта, що вимірюється. Положення краю кромки об'єкта відрізняється від краю у профілі освітленості ЛФП, що у свою чергу викликає розбіжність оптичних променів, що випромінюються джерелом оптичного випромінювання (рис.1.13).

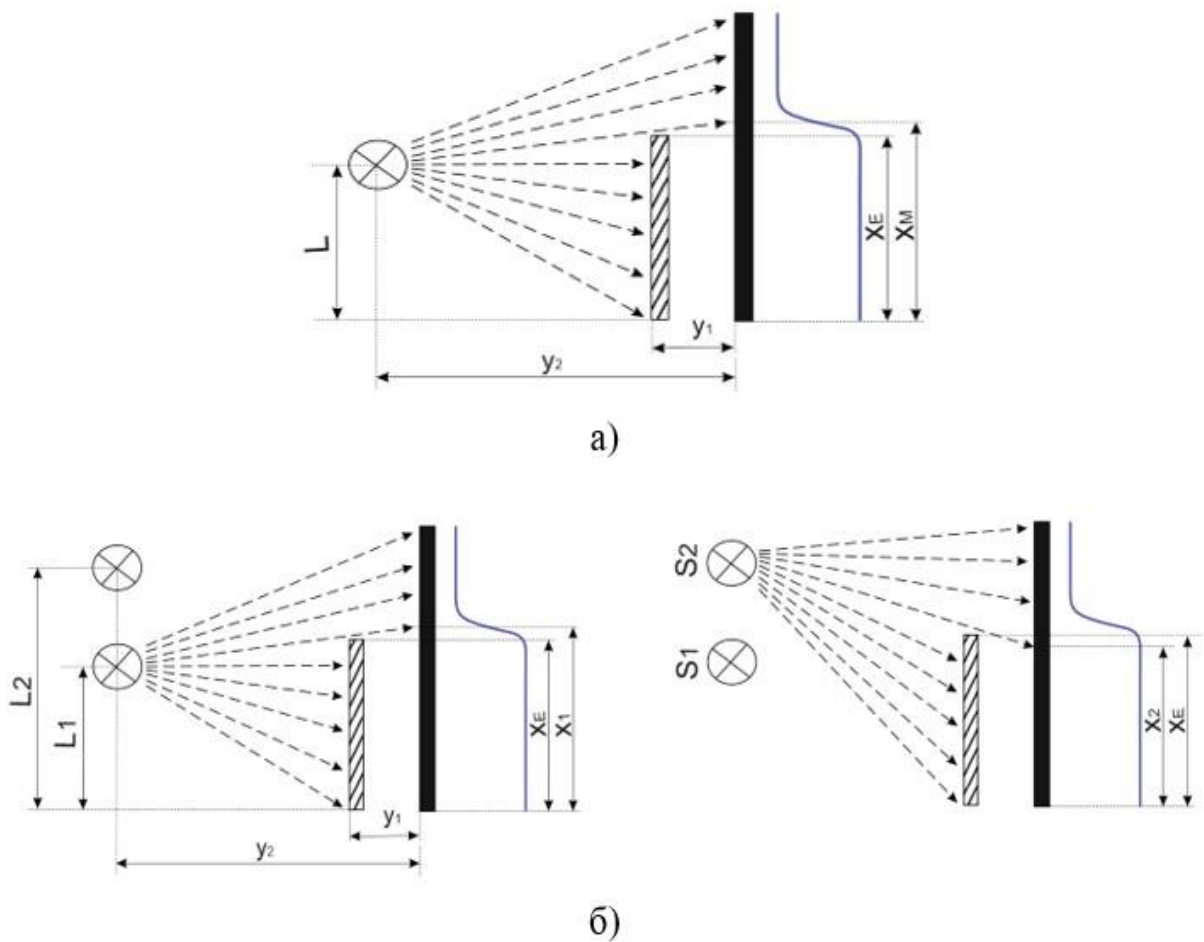


Рис. 1.13.Позиції вимірювання під час використання точкового оптичного випромінювання: а – одне джерело оптичного випромінювання, б – два джерела оптичного випромінювання.

Розрахункове значення положення краю об'єкта  $x_E$ , що вимірюється, в цьому випадку, визначається в залежності від положення джерела оптичного випромінювання  $L$ , положення краю в профілі освітленості  $x_M$ , відстані від ЛФП до

об'єкта, що вимірюється  $y_1$ , відстані від ЛФП до джерела оптичного випромінювання  $y_2$ .

$$x_E = \frac{y_1}{y_2}(L - x_M) + x_M. \quad (1.13)$$

Для реалізації цього методу необхідно встановити фактичне значення відстані від ЛФП до об'єкта, що вимірюється  $y_1$ , що і є його недоліком. Застосування додаткового джерела оптичного випромінювання усуває зазначений недолік.

Реалізація алгоритму для визначення положення кромки об'єкта з використанням двох точкових джерел оптичних випромінювань складається з двох циклів, що чергуються. При зміні кожного циклу задіюється лише одне джерело оптичного випромінювання і положення краю об'єкта, що вимірюється визначається:

$$x_E = \frac{L_2 x_1 - L_1 x_2}{L_2 - L_1 + x_1 - x_2}. \quad (1.14)$$

Очевидно, що в даній інтерпретації методу визначення краю об'єкта, що вимірюється, виключена необхідність урахування відстані від вимірюваного об'єкта до ЛФП, але не виключено його вплив на точність вимірювання. Збільшення цієї відстані призводить до зростання похибок вимірювань внаслідок збільшення ширини краю в профілі освітленості ЛФП.

Таким чином, запропоновані в роботі [10] методи забезпечують безконтактне вимір положення об'єкта використанням ЛФП. Кожен із представлених методів називається «тіньовим».

Перший метод, за рахунок використання колімованого променя забезпечує більш точне визначення положення краю об'єкта, що вимірюється, але вимагає наявності колімуючої лінзи. Другий метод дозволяє здійснити використання простішої конструкції, але ускладнює алгоритм визначення положення краю об'єкта, що вимірюється. У всіх випадках діапазон вимірюваних переміщень обмежений довжиною ПЗЗ-датчика. При використанні точкового джерела світла, освітлення

ПЗЗ-лінійки здійснюється нерівномірно, що призводить до дифракції світла і, як наслідок, низької точності визначення величини зміщення об'єкта. Нарешті, при дії вібрацій та ударів, похибка вимірювань досягатиме десятків відсотків.

Зазначених недоліків можна уникнути при використанні відомого методу обчислення координат світлової плями, що проектується на поверхню ЛФП при використанні так званого центроїд - методу [7]. На першому етапі обчислень визначаються номери пікселя ЛФП  $X_{\max}$ , амплітуда сигналу, в якому відповідає локальному максимуму  $A_{\max}$  у межах світлової плями на поверхні ЛФП (рис. 1.14).

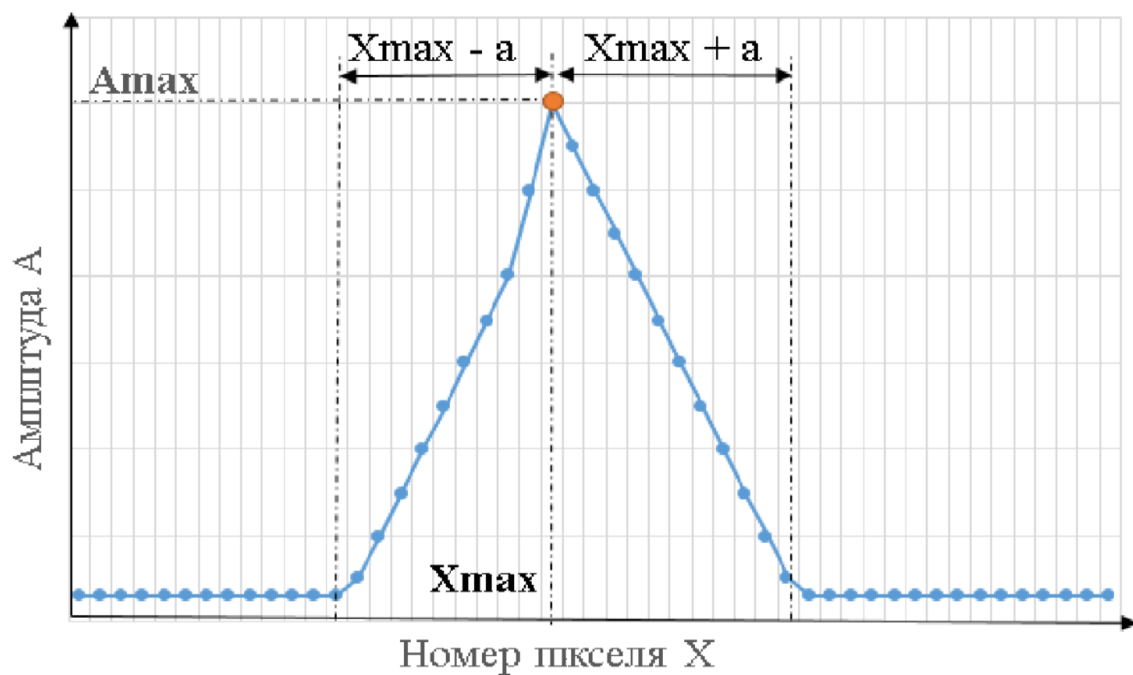


Рис. 1.14. Розподіл амплітуди напруги за пікселями ЛФП в межах світлової плями

Потім виділяється область з пікселів до  $i$  пікселів після максимуму.

Далі для цієї галузі здійснюється обчислення центру ваги оптичної плями  $C$ , виражене в номері пікселя, за формулою:

$$C = \frac{\sum_{i=X_{\max}-a}^{X_{\max}+a} (A_i \times i)}{\sum_{i=X_{\max}-a}^{X_{\max}+a} (A_i)}, \quad (1.15)$$

де  $A_i$ - амплітуда сигналу з  $i$ -го пікселя на околицях плями,  $X_{max}$ - номер пікселя, амплітуда з якого в межах плями максимальна.

Кількість пікселів  $a$  вибирається таким чином, щоб охопити всі пікселі навколо локального максимуму, амплітуда сигналу, з яких помітно перевищує початковий (темновий) рівень.

### **Висновки з першого розділу**

Аналіз науково-технічної літератури про конструктивні особливості, метрологічні характеристики, методи розробки та проектування ПЧЕ, методи розробки та проектування вторинних перетворювачів датчиків тисків, як елементів СПС, дозволив зробити наступні висновки:

1. Сучасний конструктивний вигляд датчиків статичного і повного тисків не задовольняє повною мірою потреби в високоточних, енергоємних і малогабаритних датчиках тисків, особливо в цифрових системах повітряних сигналів, що стрімко розвиваються, інтегрованих систем резервних приладів і безпілотних літальних апаратів з обмеженою енергоозброєністю.

2. Встановлено основні фактори, що впливають на похибки вимірювань з використанням пружних чутливих елементів, зокрема контактний вплив первинного та вторинного перетворювачів тисків, точність перетворення інформації сигналу від первинного перетворювача вторинним.

3. Наразі відсутні методики розрахунку ПЧЕ датчиків статичного та повного тисків, які б враховували закономірність зміни тиску за висотою (для датчиків статичного тиску) та за швидкістю (для датчиків повного тиску), пов'язуючи їх з функціональними можливостями вторинного перетворювача на базі ПЗС лінійок.

4. З урахуванням досвіду інтеграції відомих пристроїв на базі фотоелектронних приймачів до вимірювальної техніки, конструктивний вигляд вторинних

перетворювачів тисків може бути розширений за рахунок використання оптоелектронного перетворювача, що володіє високою чутливістю, малим енергоспоживанням, малими габаритами і масою.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПРУЖНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА З ВРАХУВАННЯМ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВТОРИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

#### 2.1. Математичні залежності між статичною характеристикою ПЧЕ та порогу чутливості вторинного перетворювача

Фундаментальні основи з розрахунку статичних характеристик ПЧЕ виконаних у вигляді плоских та гофрованих мембран були закладені майже 72 роки тому. Рівняння великих статичних прогинів мембрани з дуже пологим синусоїдальним гофруванням, запропоновані Д.Ю. Панова дозволили отримати статичну характеристику мембрани. Однак, результати розв'язування рівнянь давали значну розбіжність від реальних прогинів.

Значний внесок у розвиток методів статичного розрахунку ПЧЕ, виконаних у вигляді гофрованих мембран, внесла Л.Є. Андрєєва. У її роботах визначено методику статичного розрахунку ПЧЕ у вигляді мембран з гофруванням довільної форми та глибини. Основний розрахунковий вираз[10]:

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = \eta a \frac{\omega_0}{h} + \xi b \frac{\omega_0^3}{h^3}, \quad (2.1)$$

де  $p$  – тиск при заданому прогині центру мембрани,  $R$  – радіус мембрани (рис. 2.1),  $\omega_0$  – прогин центру мембрани,  $E$  – модуль пружності першого роду,  $a$  і  $b$  – коефіцієнти, що залежать від форми профілю мембрани та природи матеріалу,  $\eta$  та  $\xi$  – коефіцієнти, що залежать від форми профілю та радіусу жорсткого центру.

Нижче наведено обґрунтування алгоритму, який дозволяє здійснити з урахуванням технічних характеристик вторинного перетворювача розрахунок основних конструктивних параметрів мембранних ПЧЕ практично у всьому діапазоні їх типорозмірів.

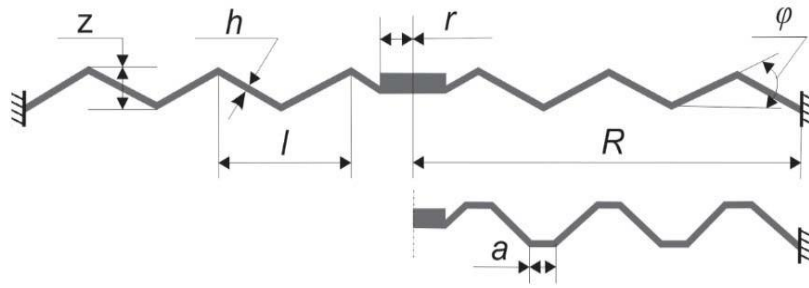


Рис.2.1.Геометричні розміри мембрани:

$R$  – робочий радіус мембрани,  $r$  – радіус жорсткого центру,  $h$  – товщина мембрани,  $z$  – глибина гофри,  $l$  – довжина хвилі гофри,  $\varphi$  – кут нахилу хвилі,  $a$  – ширина трапеції (для трапецеїдального профілю мембрани)

Для врахування технічних характеристик вторинного перетворювача поставимо поріг чутливості вторинного перетворювача  $S$  в мм, а прогин центру мембрани представимо, як:

$$\omega_{0i} = Si, \quad (2.2)$$

де  $i$ - крок виміру тобто,цілочисельні значення від 1 до  $i_{\max} \approx \omega_{0\max} / S$ .

Під порогом чутливості датчика розуміється мінімальне значення прогину жорсткого центру мембрани, що реєструється при обробці сигналу з ЛФП.

Перетворюючи вирази (2.1) та (2.2), отримаємо:

$$P_i = \left( \eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4}, \quad (2.3)$$

де  $P_i$ - виміряний тиск на  $i$  - кроці вимірювання.

Значення висоти  $H$ , при заданому значенні статичного тиску  $P$ , визначається за формулою:

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\tau R} \right], \quad (2.4)$$

де  $P_0$ - тиск на опорній висоті,  $P_a$ ,  $T_0$  - температура на нульовій висоті в К,  $\tau$  - температурний градієнт в  $^{\circ}\text{C} / \text{м}$ ,  $R$  - газова постійна в  $\text{м} / ^{\circ}\text{C}$ ,  $H$  - висота в м.

Перетворюючи вирази (2.3) та (2.4), отримаємо:

$$H_i = \left[ 1 - \frac{\left( \left( \eta a \frac{Si}{h} + \xi b \frac{(Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} \right)^{\tau R}}{P_0} \right] \frac{T_0}{\tau}, \quad (2.5)$$

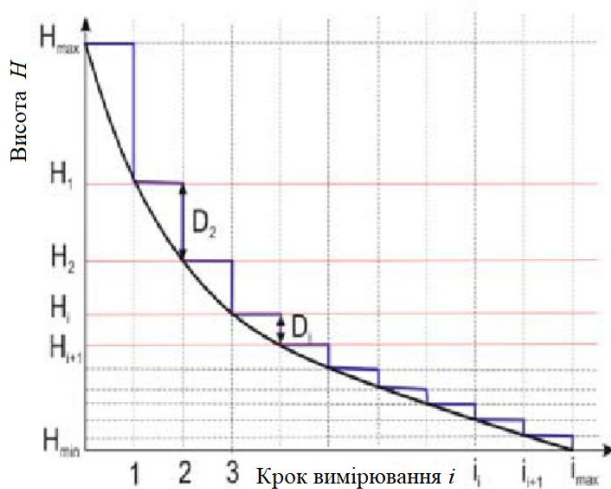
де  $H_i$  – вимірне значення висоти на  $i$  – кроці виміру.

Для оцінки похибки вимірювання датчика тиску введемо поняття дискретність вимірювання  $D_{Hi}$ , на етапі вимірювання:

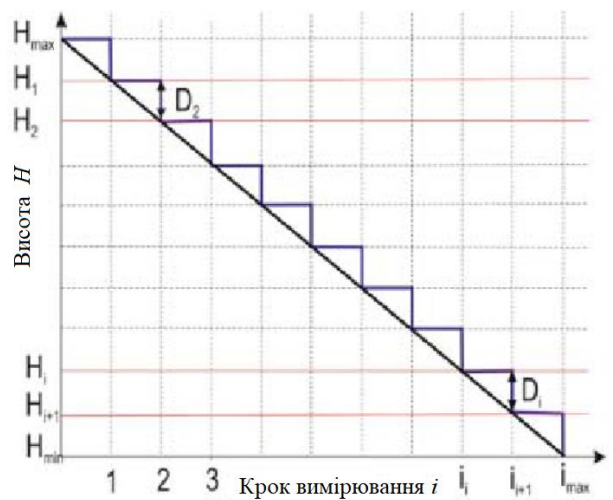
$$D_{Hi} = H_{i+1} - H_i. \quad (2.6)$$

Саме цей параметр надалі використовуватиметься як опорний параметр для оцінки похибки вимірювання датчика тиску на стадії розробки пружного чутливого елемента.

Закономірність зміни  $D_{Hi}$  в робочому діапазоні висот залежить від характеристики ПЧЕ. Якщо характеристика пружного чутливого елемента близька до лінійної тиску (рис. 2.2, а), то дискретність  $D_{Hi}$  зі збільшенням висоти значно збільшується що призводить до зниження точності вимірювання. Якщо характеристика  $D_{Hi}$  лінійна за висотою (рис.2.2, б), то  $D_{Hi} = \text{const}$ .



а)



б)



Рис. 2.2. Характеристика ПЧЕ: а – лінійна за тиском, б – лінійна за висотою

Змінюючи геометричні розміри ПЧЕ, можна отримати такі його характеристики, які забезпечать задану точність вимірювання висоти відповідно до вимог додатка 8 до Норм льотної придатності літаків НЛГС-3. У разі застосування високочутливих вторинних перетворювачів, як оптоелектронні пристрої, з'являється можливість збільшити товщину пружного чутливого елемента, що позитивно позначиться на його довговічності і динамічній стійкості, а також дозволить уникнути пружних післядій.

Аналіз виразів (2.5) і (2.6) показує, що величину дискретності впливають геометричні розміри пружного чутливого елемента, його профіль і матеріал, і навіть значення порога чутливості вторинного перетворювача. Чим менший поріг чутливості вторинного перетворювача, за інших рівних умов, тим менша величина дискретності і, відповідно, вища точність виміру.

Аналогічним чином визначимо дискретність вимірювання датчика швидкості. Відомо що:

$$P^* = P + \frac{\rho c^2}{2}, \quad (2.7)$$

де  $P^*$  – повний тиск,  $P$  – статичний тиск,  $\rho$  – густина повітря, тоді

$$c = \sqrt{\frac{2(P^* - P)}{\rho}}. \quad (2.8)$$

Так як, в запропонованому датчику, для вимірювання статичного і повного тиску в якості опорного тиску використовується вакуум, то чутливий пружний елемент має початковий навантажений стан, тобто, мембрана прогнута на величину  $\omega_{0ст}$  під дією статичного тиску  $P$ . Тоді, перетворюючи вирази (2.3) та (2.8), отримаємо:

$$c_i = \sqrt{\frac{2 \left[ \left( \eta a \frac{(\omega_{0cm} + Si)}{h} + \xi b \frac{(\omega_{0cm} + Si)^3}{h^3} \right) \frac{Eh^4}{R^4} - P \right]}{\rho}}; \quad (2.9)$$

$$P_{дин i} = \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (2.10)$$

де  $P_{дин i}$  - динамічний тиск при швидкості  $c_i$ .

$$P_i^* = P + \frac{\rho c_i^2}{2}, \quad (2.11)$$

де  $P_i^*$  - повний тиск при швидкості  $c_i$ .

Дискретність вимірів  $D_{ci}$  при швидкості  $c_i$ :

$$D_{ci} = c_{i+1} - c_i. \quad (2.12)$$

Запропонована методика дозволяє проводити розрахунок статичних характеристик датчиків повного та статичного тисків для мембран з довільним гофруванням та з урахуванням технічних характеристик вторинного перетворювача при різних значеннях та закономірностях зміни вимірюваної фізичної величини.

Далі слід розрахувати максимальну напругу  $\sigma_{max}$  при максимальному робочому навантаженні та коефіцієнт запасу міцності  $k$ .

## **2.2. Чисельне моделювання пружно-пластичних деформацій ПЧЕ методом кінцевих елементів з використанням програмного комплексу ANSYS**

Дуже швидкий розвиток обчислювальної техніки призвело до того, що ті методи, які вимагали трудомістких і тривалих математичних розрахунків, стали не актуальними і не такими точними в порівнянні з тим, що дозволяють САЕ-системи інженерного аналізу.

Відомі САЕ-системи інженерного аналізу [8], такі як ANSYS, ABAQUS, I-DEAS, COSMOS, NASTRAN, дозволяють виконати якісне моделювання пружно-пластичних деформацій, що виникають при зовнішній дії. Зазначені системи

дозволяють також репрезентувати відгук системи у вигляді деформації та розподілу напруг.

Використання таких програм прискорює роботу конструкторських бюро та скорочує час розробки, знижує вартість виробів та підвищує якість пружних чутливих елементів, що створюються.

Одним із найпоширеніших таких комплексів, на сьогоднішній день, є програма ANSYS, яка використовує метод кінцевих елементів.

Даний метод широко використовується для вирішення складних завдань щодо визначення пружнопластичних деформацій, що не мають прямого аналітичного рішення.

Основні етапи кінцево-елементного моделювання [2]:

1. Постановка задачі (вибір математичної моделі).
2. Розробка (або імпорт) геометричної моделі геометричного об'єкта, що досліджується.
3. Вибір чи завдання властивостей матеріалів.
4. Створення кінцево-елементної моделі (створення сітки).
5. Завдання граничних умов.
6. Завдання контактних умов.
7. Визначення вихідних даних результатів рішення.
8. Рішення.
9. Аналіз результатів розв'язання.

Вкрай важливим етапом у проектуванні ПЧЕ є розрахунок максимальної напруги  $\sigma_{\max}$  при максимальному робочому навантаженні та коефіцієнт запасу міцності  $k$ . Саме ці показники відображають здатність пружного чутливого елемента зберігати свою працездатність у всьому діапазоні експлуатаційних навантажень.

Для визначення максимальної напруги  $\sigma_{\max}$  та коефіцієнтів запасу міцності  $k$  у програмному комплексі ANSYS DesignModeler розроблено моделі пружних чутливих елементів, геометричні розміри яких представлені в таблиці 2.1.

Для врахування нелінійної залежності між напругою та деформацією використовувалося рівняння Ромберга-Осгуда:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, \quad (2.13)$$

де  $\varepsilon$  – деформація,  $\sigma$  – напруга,  $E$  – модуль пружності першого роду,  $\sigma_{0,2}$  – умовна межа текучості, а  $n$  виражається як:

$$n = \ln \left( \frac{\delta - \frac{\sigma_{\text{пл}}}{E}}{0,002} \right) / \ln \left( \frac{\sigma_{\text{пл}}}{\sigma_{0,2}} \right), \quad (2.14)$$

де  $\delta$  - відносне подовження після розриву,  $\sigma_{\text{пл}}$ - межа пропорційності.

Таблиця 2.1

Матеріал та геометричні розміри ПЧЕ

№ ПЧЕ	Матеріал ПЧЕ	Профіль ПЧЕ	R, мм	h, мм	H, мм	n, шт.
1	Бронза БрБНТ 1.9	Трапецеїдальний	35,98	0,13	1,088	4
2	Бронза БрБ2	Синусоїдальний	25	0,22	0,75	3
3	Бронза БрБ2	Синусоїдальний	23,25	0,145	0,26	6
4	Бронза БрБНТ 1.9	Синусоїдальний	24,75	0,135	0,4	12
5	Бронза БрБ2	Пильчастий	27,74	0,15	0,54	5
6	Бронза БрБ2	Синусоїдальний	24,92	0,13	0,42	8

Крива деформування бронзи БрБ2 представлена на рис. 2.3.

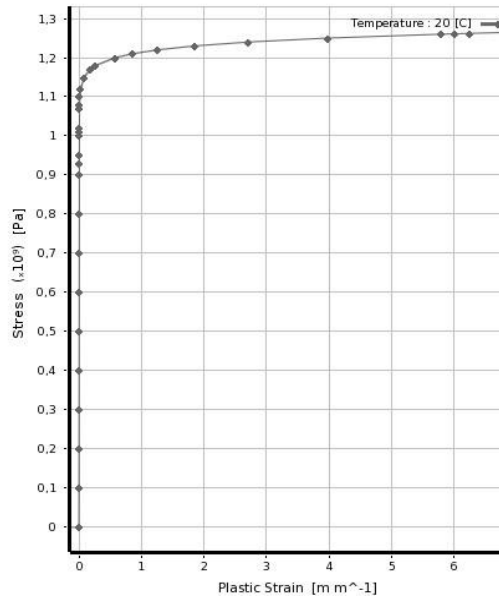


Рис. 2.3.Крива деформування бронзи БрБ2

Далі слідує передача геометричних моделей в модуль ANSYSMechanical та створення сіткової моделі (рис. 2.4).

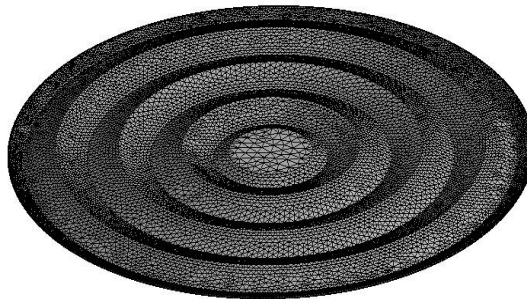
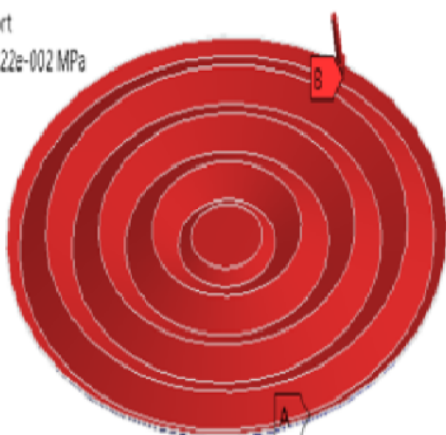


Рис. 2.4.Кінцево-елементна модель

Завдання граничних умов: жорстке закладення (FixedSupport) по краях гофрованої мембрани (вісь Z), зверху (вісь Y) діє рівномірно розподілений тиск (Pressure) величиною 0,107 МПа (для датчика статичного тиску) (рис. 2.5,а) та 0,131 МПа (для датчика повного тиску) з кроком застосування навантаження 0,005 МПа (рис. 2.5,б).

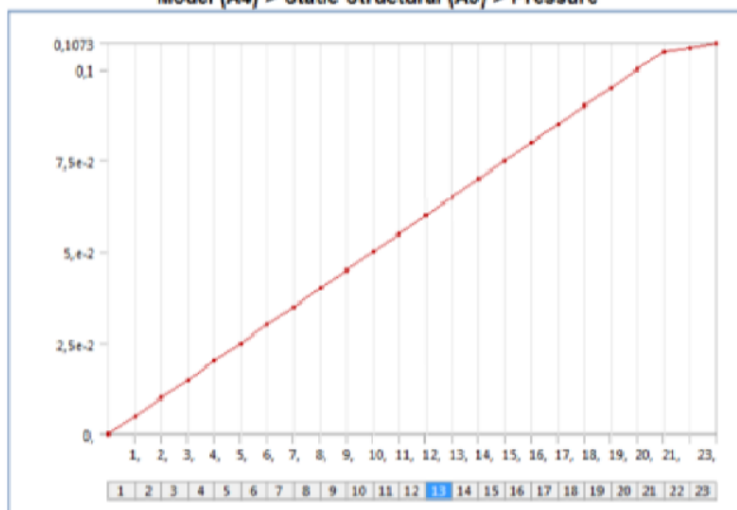
A: Static Structural  
 Static Structural  
 Time: 12,644 s

A Fixed Support  
 B Pressure: 6,322e-002 MPa



*a*

FIGURE 1  
 Model (A4) > Static Structural (A5) > Pressure



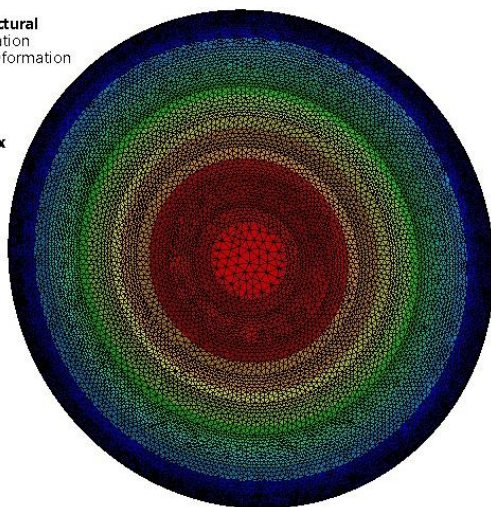
*б*

Рис. 2.5. Граничні умови: а - жорстка загортка (FixedSupport) по краях гофрованої мембрани (вісь Z), зверху (вісь Y) діє рівномірно розподілений тиск (Pressure)

Рішення. В результаті роботи програми отримано відгук системи у вигляді полів деформації (рис. 2.6, а), розподілу напруги (рис. 2.6, б), а також отримано значення коефіцієнтів запасу міцності (рис. 2.6, в).

A: Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 23

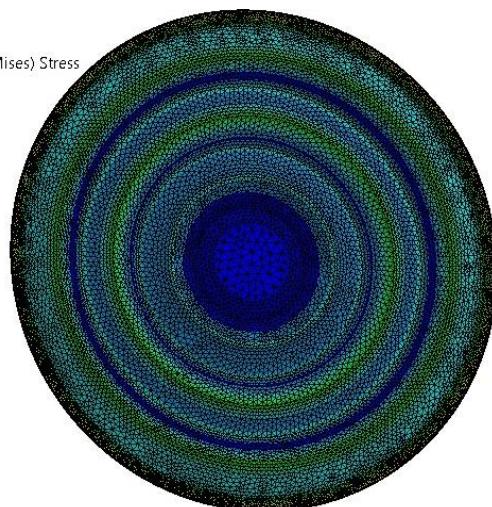
1,037 Max  
 0,92174  
 0,80652  
 0,69131  
 0,57609  
 0,46087  
 0,34565  
 0,23044  
 0,11522  
 0 Min



*a*

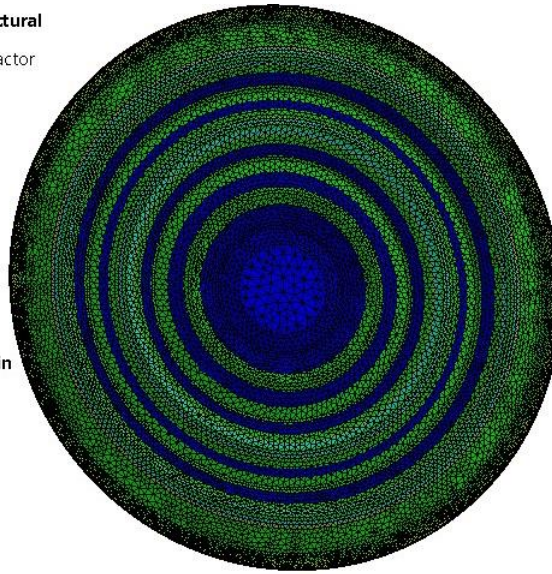
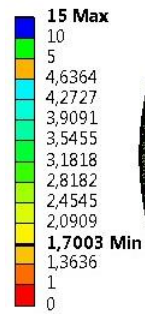
A: Static Structural  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 23

705,75 Max  
 627,45  
 549,14  
 470,83  
 392,53  
 314,22  
 235,92  
 157,61  
 79,305  
 0,99869 Min



*б*

**A: Static Structural**  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 23

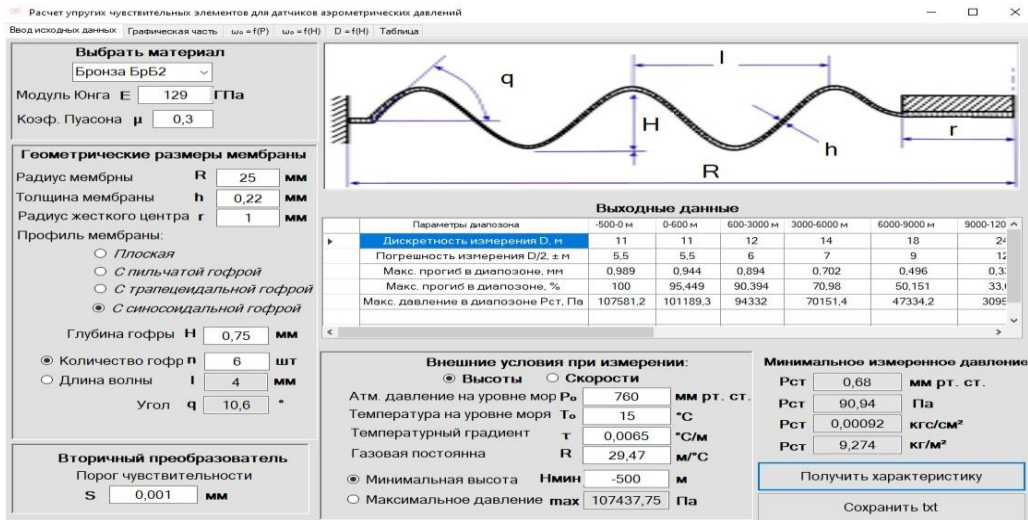


*б*

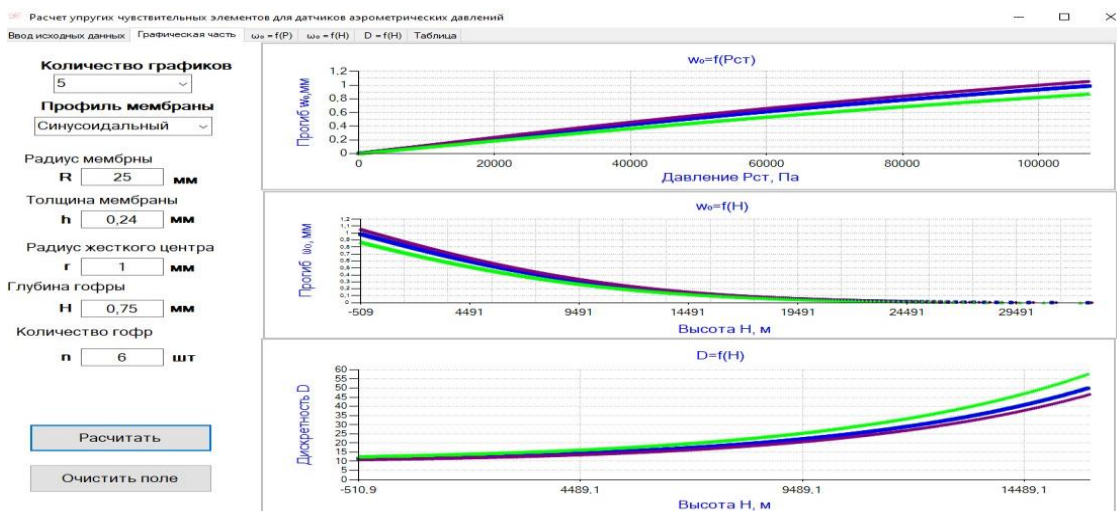
Рис. 2.6.Результат рішення: *а* – розподіл полів деформації, *б* – розподіл полів еквівалентних напруг, *в* – розподіл полів з коефіцієнтом запасу міцності

## 2.3. Розробка алгоритму статичного розрахунку ПЧЕ для датчиків статичного та повноготисків

На рис. 2.7 наведений графічний інтерфейс користувача програми [7], розробленої мовою програмування C++, реалізує алгоритм розрахунку ПЧЕ.



Крім того, програма дозволяє здійснювати графічне доведення (рис.2.8) характеристик мембранних ПЧЕ варіацією вихідних даних.





Узагальнений алгоритм розрахунку виглядає так:

1. Введення вихідних даних.
  - 1.1. Матеріал та розміри.
    - 1.1.1. Матеріал ПЧЕ:  $E$ ,  $\mu$  (коефіцієнт Пуассона).
    - 1.1.2. Геометричні розміри та профіль ПЧЕ:  $R$ ,  $h$ ,  $r_0$ ,  $z$ , кількість гофр  $n$ .
  - 1.2. Поріг чутливості вторинного перетворювача  $S$ .
2. Вибір розрахункової схеми.
  - 2.1. Датчик статичного тиску.
  - 2.2. Датчик повного тиску
3. Зовнішні умови при вимірі:
  - 3.1. Якщо вибрано п. 2.1., введення  $P_0$ ,  $R$ ,  $T_0$ ,  $\tau$ ,  $H_{\min}$  або  $P_{\max}$ .
  - 3.2. Якщо вибрано п. 2.2., введення  $P_0$ ,  $\rho$ ,  $c_{\max}$  або  $P_{\text{динмак}}$ .
4. Рішення.
  - 4.1. Обчислення коефіцієнтів:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\alpha$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\eta$ ,  $\xi$ .
  - 4.2. Якщо вибрано п. 2.1, обчислення зі збереженням значень  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $H_i$  та  $D_{Hi}$  в масиві даних при  $i$  від 1 до  $i_{\max} = \omega_{0\max} / S$ , де  $\omega_{0\max} = f(P_{\max})$ .
  - 4.3. Якщо вибрано п. 2.2., обчислення с збереженням значень  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $c_i$  та  $D_{ci}$  в масиві даних при  $i$  від 1 до  $i_{\max} = \omega_{\max} / S$ , де  $\omega_{\max} = f(P_{\text{динмак}})$ .
5. Вихідні дані.
  - 5.1. Отримання графічних залежностей:
    - 5.1.1. Якщо вибрано пункт 2.1  $\omega_0 = f(P)$ ,  $\omega_0 = f(H)$ ,  $D_H = f(H)$ .
    - 5.1.2. Якщо вибрано пункт 2.2.  $\omega_0 = f(P_{\text{дин}})$ ,  $\omega_0 = f(c)$ ,  $D_c = f(c)$ .
  - 5.2. Виведення значень у таблицю (рис. 2.9), що містить:
    - 5.2.1. Якщо вибрано п. 2.1:  $i$ ,  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $H_i$ ,  $D_{Hi}$ .
    - 5.2.2. Якщо вибрано п. 2.2:  $i$ ,  $P_i$ ,  $\omega_{0i}$ ,  $c_i$ ,  $D_{ci}$ .
6. Аналіз одержаних результатів.

6.1. Якщо  $D_{Hi}$  ( $D_{ci}$ ) не забезпечує необхідну точність вимірювання (відповідно до вимог НЛГС-3), то перехід до п. 2.

7. Збереження результатів у текстовому файлі.

	Рст. Па	w, мм	H, м	D, м	D/2, м
1	105,52	0,001	32417,465	1688,341	844,17
2	211,04	0,002	30729,123	1096,672	548,336
3	316,56	0,003	29632,45	831,409	415,704
4	422,08	0,004	28801,04	677,196	338,598
5	527,6	0,005	28123,844	575,208	287,604
6	633,13	0,006	27548,636	502,255	251,127
7	738,65	0,007	27046,381	447,226	223,613
8	844,18	0,008	26599,154	404,092	202,046
9	949,7	0,009	26195,061	369,283	184,641
10	1055,23	0,01	25825,778	340,542	170,271
11	1160,76	0,011	25485,235	316,37	158,185
12	1266,29	0,012	25168,865	295,729	147,864
13	1371,82	0,013	24873,136	277,877	138,938
14	1477,35	0,014	24595,258	262,271	131,135
15	1582,89	0,015	24332,986	248,499	124,249
16	1688,43	0,016	24084,487	236,248	118,124
17	1793,97	0,017	23848,238	225,271	112,635
18	1899,51	0,018	23622,967	215,374	107,687
19	2005,06	0,019	23407,593	206,4	103,2
20	2110,6	0,02	23201,192	198,222	99,111
21	2216,15	0,021	23002,97	190,736	95,368
22	2321,71	0,022	22812,233	183,855	91,927
23	2427,26	0,023	22628,378	177,506	88,753
24	2532,82	0,024	22450,872	171,628	85,814
25	2638,38	0,025	22279,244	166,168	83,084
26	2743,95	0,026	22113,075	161,083	80,541

Рис. 2.9. Графічний інтерфейс користувача програми – виведення результатів у табличному вигляді.

Далі слідує розрахунок максимальної напруги  $\sigma_{\max}$  при максимальному робочому навантаженні та коефіцієнта запасу міцності  $k$  [10]. Перевірка умови забезпечення оптимальної робочої напруги  $\sigma_{\max} \leq [\sigma_{0,005}]$  та коефіцієнта запасу міцності  $k > [k]$  ( $[k]$  – нормативний коефіцієнт запасу міцності) методом кінцевих елементів з допомогою програмного комплексу ANSYS. Якщо  $\sigma_{\max} \geq [\sigma_{0,005}]$  або  $k < [k]$ , перехід до п. 1.1. алгоритму.

Нормативний коефіцієнт запасу міцності  $[k]$  призначається виходячи з наявного досвіду експлуатації пружних чутливих елементів. У виробках загального машинобудування застосовують  $[k] = 1,3 - 2,2$ .

## 2.4. Результатів математичного моделювання пружно-пластичних деформацій та рівнянь наближеного статичного розрахунку

При розрахунках пружних чутливих елементів датчика статичного тиску розглядався діапазон висот від мінус 500 м до 20000 м. Значення порога чутливості датчика приймали  $S = 0,001$ .

У табл. 2.2 представлені значення дискретності вимірювання за висотами, а також мінімальний вимірюваний тиск  $P_1$  та максимальний прогин мембрани  $\omega_{0max}$ . З таблиці видно, що ПЧЕ № 2 та № 5, при даній дискретності виміру, забезпечують необхідну точність відповідно до НЛГС-3.

Таблиця 2.2

Дискретність виміру за висотами

№ ПЧЕ	Дискретність вимірювання за діапазонами висот, м								Мінімальний вимірюваний тиск $P_1$ , Па	Максимальний прогин жорсткого центру $\omega_{0max}$ , мм
	-500...0	0...600	600...3000	3000...6000	6000...9000	9000...12000	12000...15000	15000...20000		
2	10	10	12	14	18	24	35	62	66,48	1,024
3	18	18	18	19	19	19	20	22	16,83	1,245
5	9	9	9	9	9	10	11	16	20,53	2,085

При розрахунках чутливих пружних елементів для датчика повного тиску розглядався діапазон швидкостей від 0 до 800 км/год. Значення порога чутливості датчика набули  $S = 0,001$ . У табл. 2.3 подано значення дискретності вимірювання за швидкостями польоту.

ПЧЕ, що розробляються, та їх кращі зразки мають похибку не більше 0,01 – 0,02 % від діапазону вимірювання статичного та повного тисків.

Точність датчиків статичного та повного тисків повинна забезпечувати високу точність визначення висотно-швидкісних параметрів ПС відповідно до міжнародних вимог.

Така висока точність до датчиків пред'являється у зв'язку з необхідністю обчислень параметрів руху лише на рівні, що відповідає міжнародним вимогам.

Таблиця 2.3

Дискретність вимірювання повітряної швидкості

№ ПЧЕ	Дискретність вимірювання повітряної швидкості												
	50	80	100	150-200	250	300	350-450	500	550-600	650	700	750	800
1	7,4	4,8	3,8	2	1,62	1,36	1,17	0,87	0,73	0,69	0,65	0,62	0,59
4	25	16	13	7,6	6	5	3,6	3,2	2,8	2,7	2,5	2,4	2,3
6	22	17	12	6	5,6	4,7	4,1	3,5	2,6	2,47	2,33	2,2	2,1

У таблиці 2.4 представлені результати розв'язання пружно-пластичних завдань шляхом кінцевих елементів.

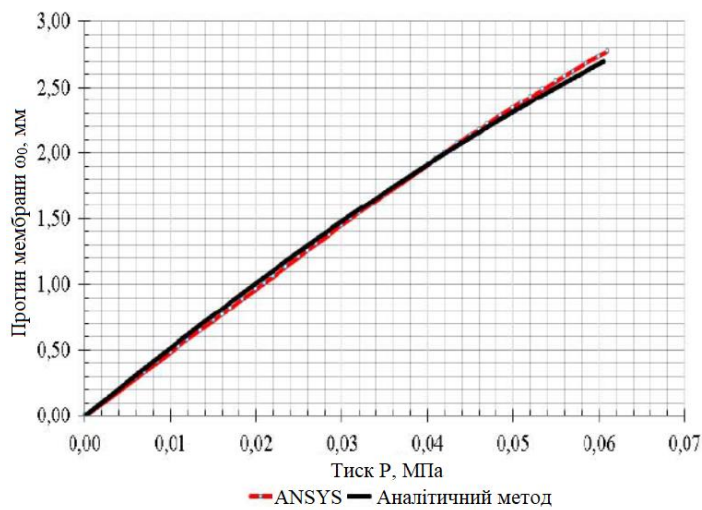
Таблиця 2.4

Результати розв'язання методом кінцевих елементів

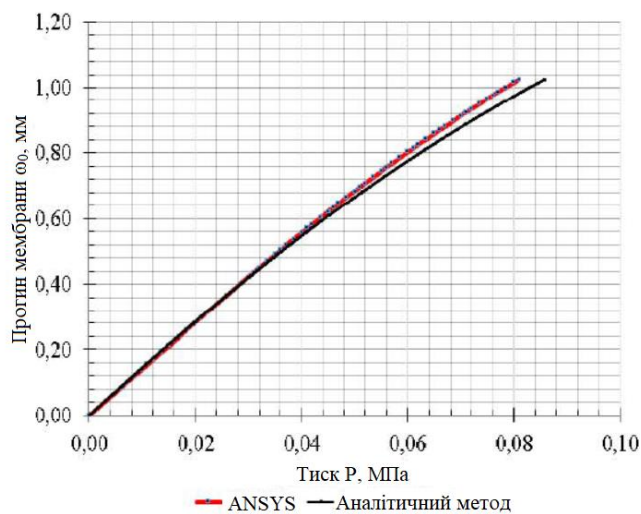
№ ПЧЕ	Totaldeformation ( $\omega_{0max}$ , мм)	Equivalentstress (еквівалентна напруга), МПа	Safetyfactor (Коефіцієнт запасу міцності)
1	4,7407	1185,2	1,01
2	1,037	705,75	1,7
3	1,58	614,52	1,95
4	2,16	716,12	1,68
5	1,364	544	2,2
6	1,676	790,36	1,52

Достовірність результатів чисельного моделювання аналітичним методом, розробленим автором, підтверджується результатами чисельного моделювання методом кінцево-елементного моделювання. На рис. 2.10 – 2.12 представлені

порівняльні результати обчислень прогинів мембрани з використанням програмного комплексу ANSYS та отриманих аналітичним методом.

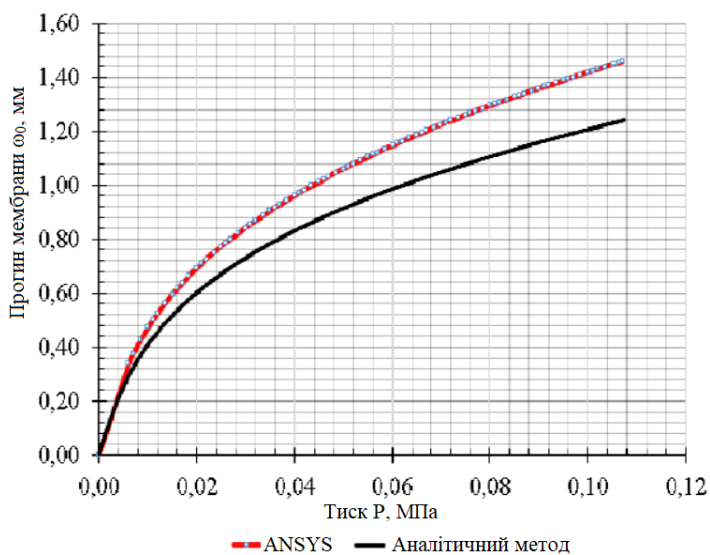


*a)*

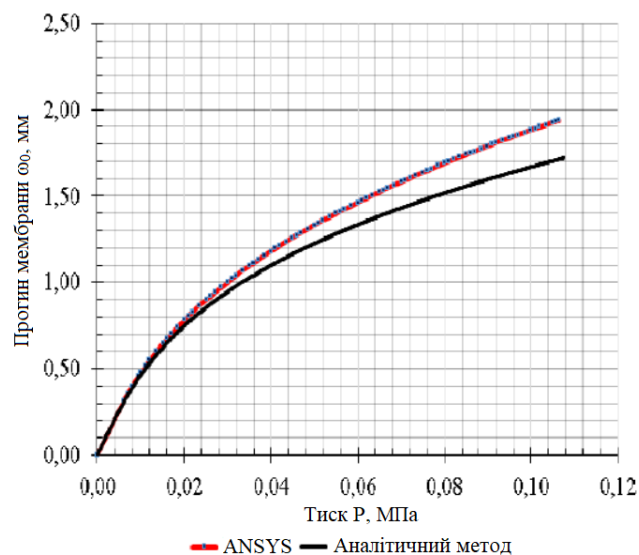


*б)*

Рис. 2.10.Результати моделювання статичної ПЧЕ: а – ПЧЕ №1, б – ПЧЕ №2



*a)*



*б)*

Рис. 2.11. Результати моделювання статичної характеристики ПЧЕ:

*a* – ПЧЕ № 3; *б* – ПЧЕ № 4.

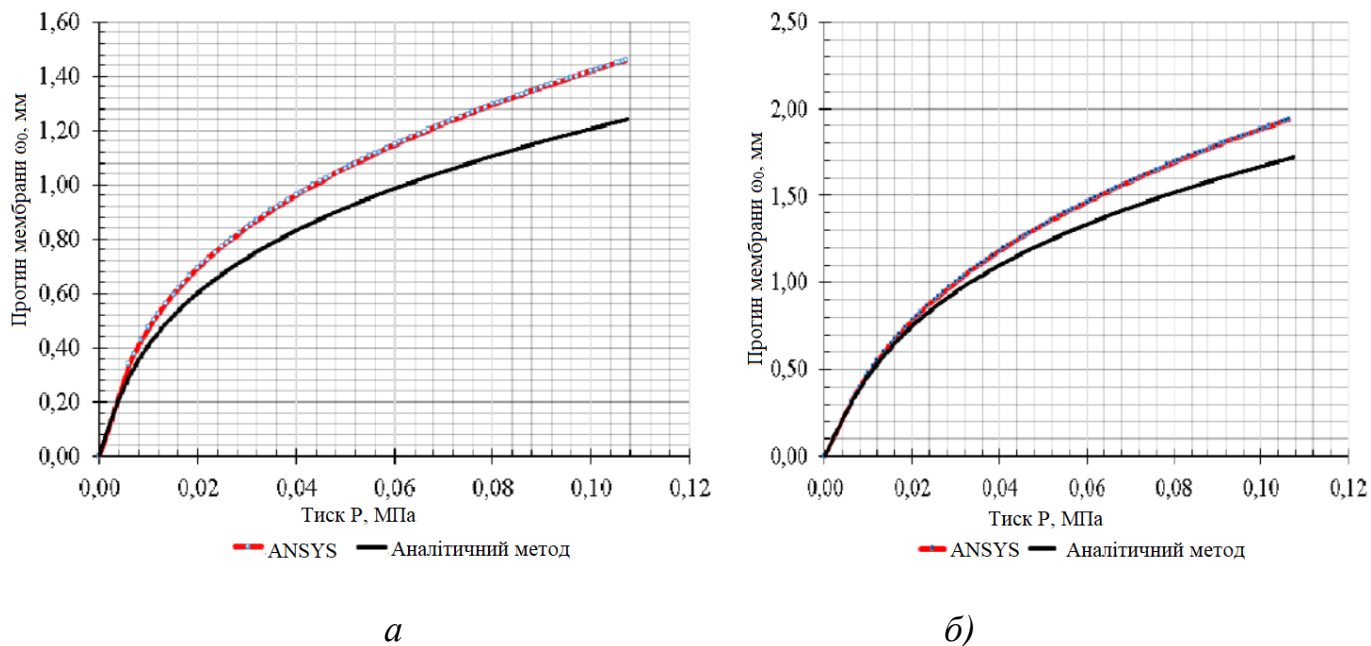


Рис. 2.12. Результати моделювання статичної характеристики пружних чутливих елементів: *a* – ПЧЕ № 5; *б* – ПЧЕ № 6.

Розбіжність результатів чисельного моделювання статичної характеристики ПЧЕ методом кінцевих елементів та аналітичним методом становить - не більше 9%.

### Висновки з другого розділу

Виконано аналіз існуючих методик чисельного моделювання статичних характеристик ПЧЕ датчиків тисків, за результатами якого встановлено, що існуючі методики розрахунку ПЧЕ не враховують закономірність зміни статичного та повного тисків залежно від висоти та швидкості польоту повітряного судна, крім того, не враховуються функціональні можливості вторинного перетворювача.

Розроблено математичні залежності, які забезпечують розрахунок ПЧЕ з урахуванням:

- закономірності зміни тиску за висотою польоту повітряного судна,
- закономірності змінюючи тиск за швидкістю польоту повітряного судна,

–функціональних можливостей вторинного перетворювача тисків, зокрема, для попередньої оцінки характеристик точності датчиків тисків на етапі проектування ПЧЕ, критерієм запропоновано параметр - поріг чутливості вторинного перетворювача.

Розроблено узагальнений алгоритм розрахунку ПЧЕ на основі отриманих математичних залежностей і звичайно - елементного моделювання пружнопластичних деформацій з використанням програмного комплексу ANSYS, що забезпечує врахування потрібних характеристик точності датчиків тисків, що розробляються, і характеристик міцності ПЧЕ за критеріями еквівалентної напруги та коефіцієнта запасу  $K$ .

На основі узагальненого алгоритму розроблено програму для ЕОМ мовою програмування C++, що забезпечує:

–розрахунок статичних характеристик ПЧЕ

–комплексну оцінку характеристик точності датчика тисків з урахуванням закономірності зміни вимірюваних тисків та порога чутливості вторинного перетворювача для різних зразків мембранних ПЧЕ,

–графічне доведення характеристик ПЧЕ та характеристик точності датчика тиску в цілому.

Проведено порівняльну оцінку результатів чисельного моделювання статичних характеристик ПЧЕ, отриманих аналітичним методом та методом звичайно – елементного моделювання, встановлено, що розбіжність у визначенні прогину жорсткого центру мембрани не перевищує 15 %.Таким чином, вперше розроблені математичні моделі взаємозв'язків інформаційних елементів з процедурами обробки даних, що отримуються при деформації ПЧЕ та викликаних зміною статичного та повного тисків, що відрізняються тим, що в них враховується поріг чутливості (або крок дискретизації) вторинного перетворювача.

Розроблена методика математичного моделювання статичної характеристики ПЧЕ, яка враховує функціональні можливості вторинного перетворювача та закономірність зміни статичного та повного тисків, може бути використана при оцінці характеристик точності датчиків тиску на етапах попереднього проектування ПЧЕ.



## РОЗДІЛ 3

# РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ОЦІНКИ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКІВ ТИСКІВ НА ОСНОВІ ЛІНІЙКИ ФОТОЕЛЕКТРОННИХ ПРИЙМАЧІВ

### 3.1. Структура апаратно-програмного комплексу

На сучасному етапі розвитку елементів та пристроїв обчислювальної техніки та систем управління при проведенні наукових експериментів виникає потреба в автоматизованих експериментальних установках. Ця потреба виникає як при створенні нового устаткування, а й за модернізації вже існуючого. І в першому, і в другому випадках експеримент не може вважатися актуалізованим, якщо процеси вимірювання та первинної обробки експериментальних даних не автоматизовані. На ринку досить велика кількість автоматизованих систем, цільове призначення яких - управління механічними та електричними складовими автоматизованих установок, збирання та обробка даних.

Однак пропоновані рішення за своїми функціональними можливостями надмірні і мають високу вартість і, як правило, націлені на промислове застосування. Крім того, враховуючи специфіку проведення експериментів, особливо коли це стосується оригінальних рішень, доцільною є розробка цільових автоматизованих систем управління та обробки експериментальних даних, що дозволить забезпечити високий ступінь інтеграції досліджуваного об'єкта та автоматизованої системи.

В рамках даної роботи, розроблено цільовий апаратно-програмний комплекс (далі – АПК), що включає набір апаратних та програмних засобів, що забезпечують автоматизацію процесу експериментальних досліджень датчика тисків на основі лінійки фотоелектронних приймачів.

Структурна схема розробленого АПК представлена на рис. 3.1.

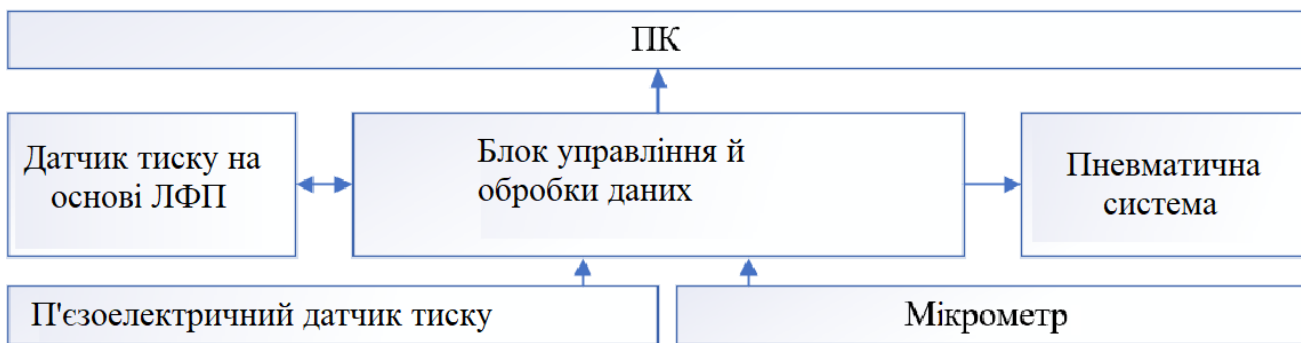


Рис. 3.1. Структурна схема апаратно-програмного комплексу

Виділимо основні етапи розробки АПК:

1. Вибір апаратних частин та розробка логіки роботи програмної частини АПК для вбудованих систем, що забезпечують:

- генерацію керуючих імпульсів для лінійки фотоелектронних приймачів,
- оцифрування вихідного сигналу лінійки фотоелектронних приймачів,
- обробку цифрового сигналу, що надходить від цифрового мікрометра,
- оцифрування вихідного сигналу тензометричного датчика тисків,
- взаємодія між обчислювальними пристроями блоку управління та обробки даних,
- обмін даними між блоком управління та персональним комп'ютером (ПК).

2. Розробка логіки роботи програмної частини АПК для ПК, що забезпечує збирання, обробку та візуалізацію контрольованих параметрів, а також введення та передачу в блок управління та обробки даних значень вимірюваних параметрів.

### 3.2. Апаратні засоби апаратно-програмного комплексу

АПК, у загальному випадку, включає у собі електронні і механічні частини обчислювальних пристроїв, які входять до складу системи, без урахування програмного забезпечення.

АПК класифікують як внутрішні та зовнішні пристрої. Узгодження між окремими вузлами та блоками виконується апаратними інтерфейсами. Апаратні інтерфейси розробляються відповідно до вимог чинних стандартів. Далі

розглянемо докладніше апаратні частини цільового АПК (рис 3.1). Досліджуваним об'єктом є складова частина цільового АПК, датчик тиску на основі ЛФП, детальніше його конструктивні особливості описано в п. 3.2.1.

Тензометричний датчик тиску є апаратною частиною АПК і використовується для оцінки характеристик точності датчика тиску на основі ЛФП за параметром тиску. Характеристики п'єзоелектричного датчика тиску та їх значення представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Характеристики п'єзоелектричного датчика тиску

Характеристики	Значення
Тип датчика	П'єзоелектричний
Напруга живлення	5 В
Діапазон вимірюваного тиску	0...103,42 кПа
Вихідна напруга	0...4,5 В
Точність датчика	0,1...1 %

З таблиці 3.1 видно, що вихідна напруга датчика тиску лежить в межах 0 - 4,5 В. Зараз більшість мікросхем, зокрема і мікросхема STM32, живляться напругою в межах від 1,8 до 3,3, відповідно і опорна напруга аналого-цифрового перетворювача лежить у цих межах. У зв'язку з цим виникає завдання узгодження вихідної напруги п'єзоелектричного датчика тиску з максимально допустимою вхідною напругою мікроконтролера. Для вирішення цього завдання застосований дільник напруги на резисторах, електрична схема якого представлена на рис. 3.2.

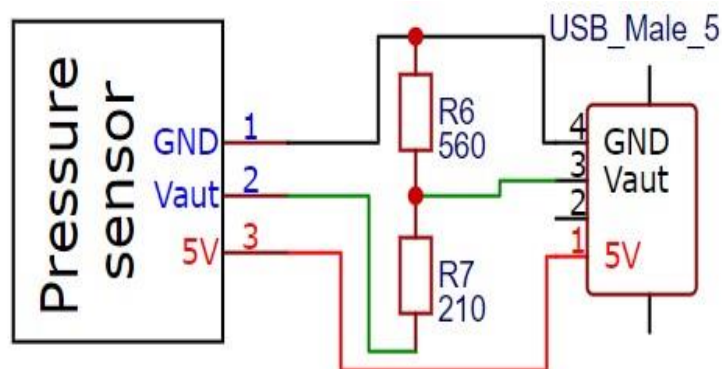


Рис. 3.2. Електрична схема підключення датчика тиску

Наступним апаратним компонентом АПК є цифровий мікрометр, який служить для оцінки характеристик точності переміщення геометричного центру ПЧЕ датчика тиску на основі ЛФП.

Характеристики мікрометра представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Характеристики мікрометра

Характеристики	Значення
Межі вимірювань	0...12,7 мм
Крок мікрометра	0,001 мм
Живлення	1хбатарея SR44
Вихідна напруга	< 1,5 Н

На логічних виходах мікрометра (рис. 3.3) Clock і DATA значення напруги не перевищують 1,25 – 1,3 В, тому для узгодження логічних виводів мікроконтролера розроблена схема підсилювача на транзисторах.

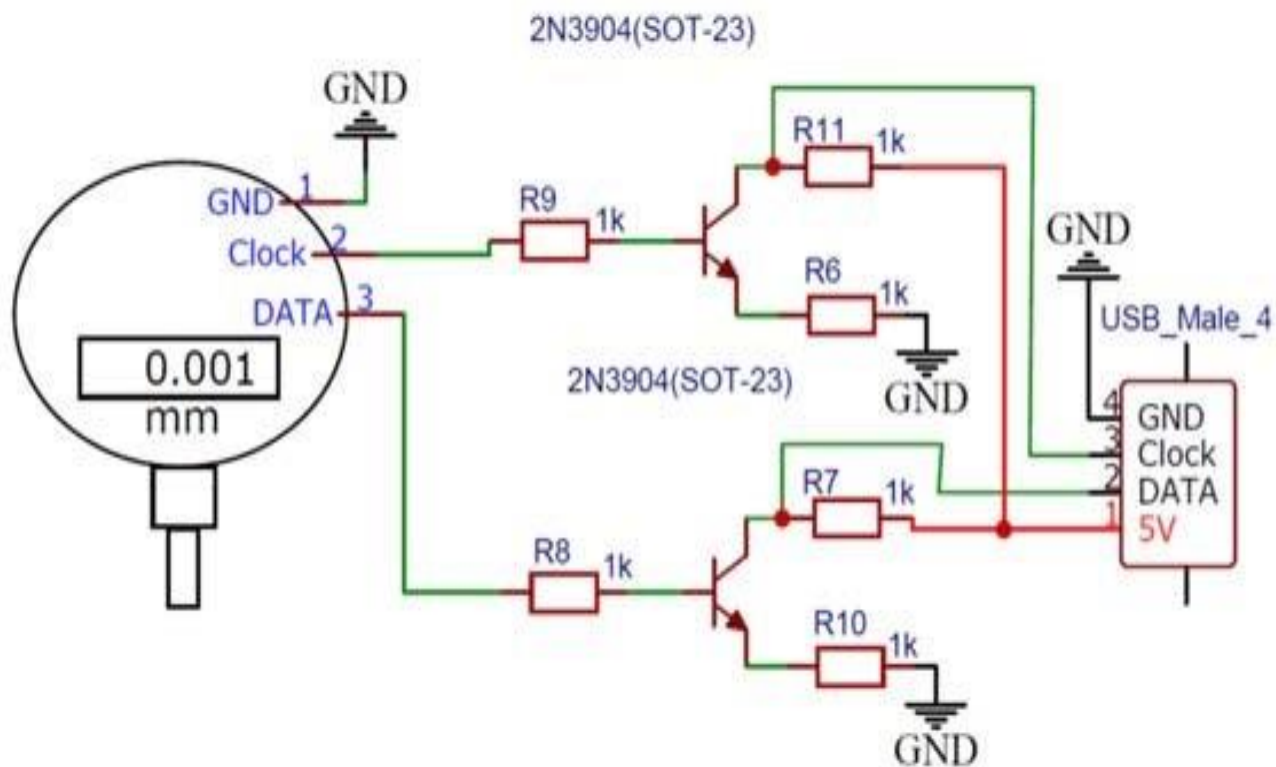


Рис. 3.3.Електрична схема підключення мікрометра

Для управління перепадом тисків у складі апаратної частини АПК є пневматична система. Функціонально система включає блок живлення, електроприводний насос, електромагнітний клапан і релейний модуль. Управління системою здійснює блок управління та обробки даних. Структурна схема пневматичної системи представлена рис. 3.4.

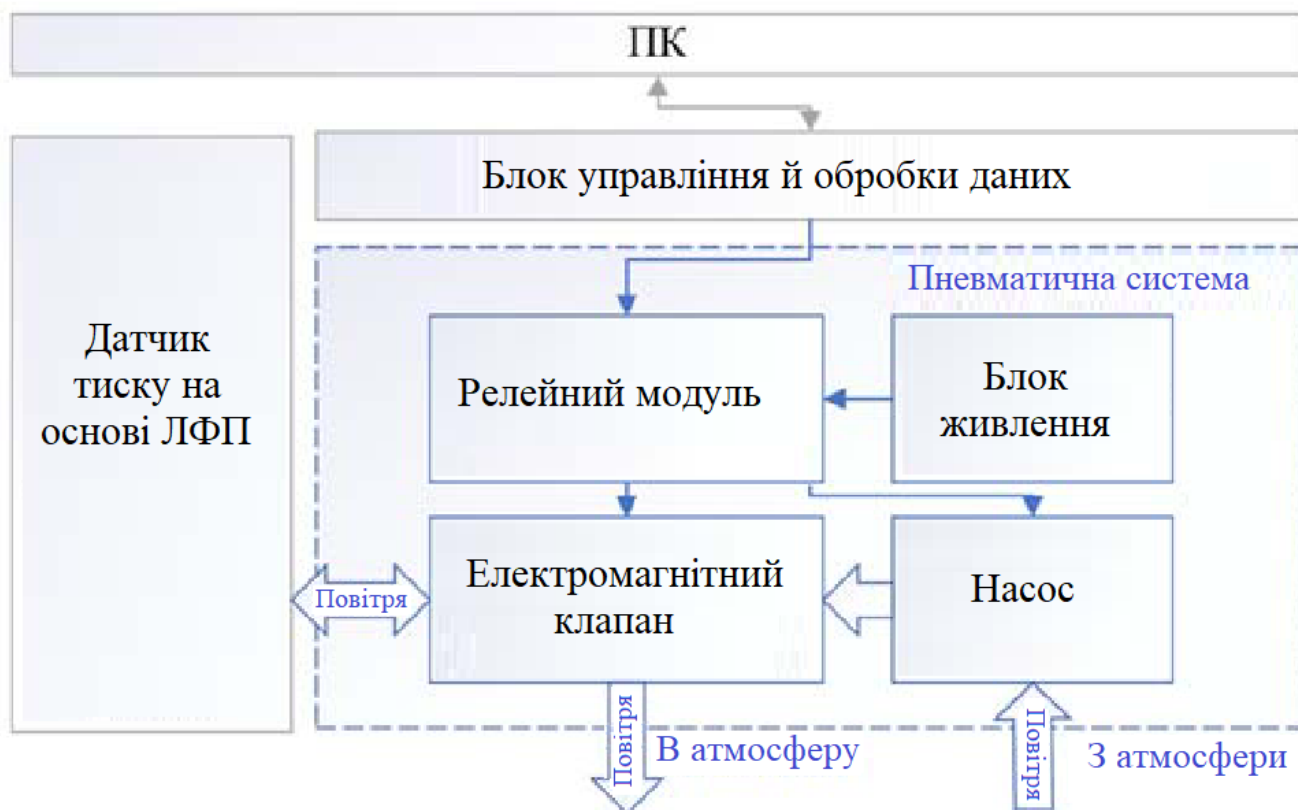


Рис. 3.4. Структурна схема пневматичної системи

Електрична схема з'єднання елементів пневматичної системи представлена на рис. 3.5, характеристики наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

#### Характеристики пневматичної системи

Характеристики	Значення
Напруга живлення електропривідного насоса	5 В
Напруга живлення електромагнітного клапана	5 В
Напруга живлення блока живлення	220 В
Напруга на виході з блока живлення	5 В
Максимальна частота обертання електропривода насоса	5300 об/хв
Нагнітальний тиск	100 кПа

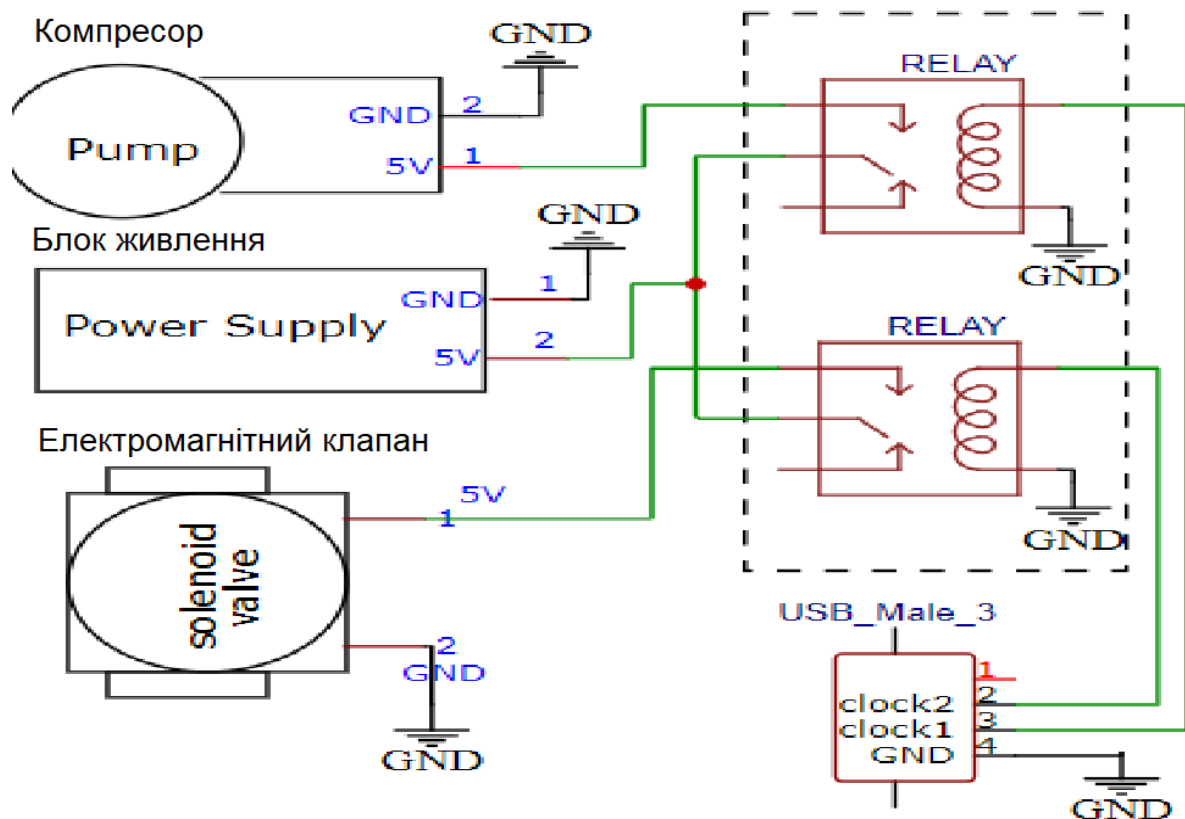


Рис. 3.5.Електрична схема пневматичної системи

Ключовою складовою АПК є блок управління та обробки даних. Його структурна схема представлена рис. 3.6.

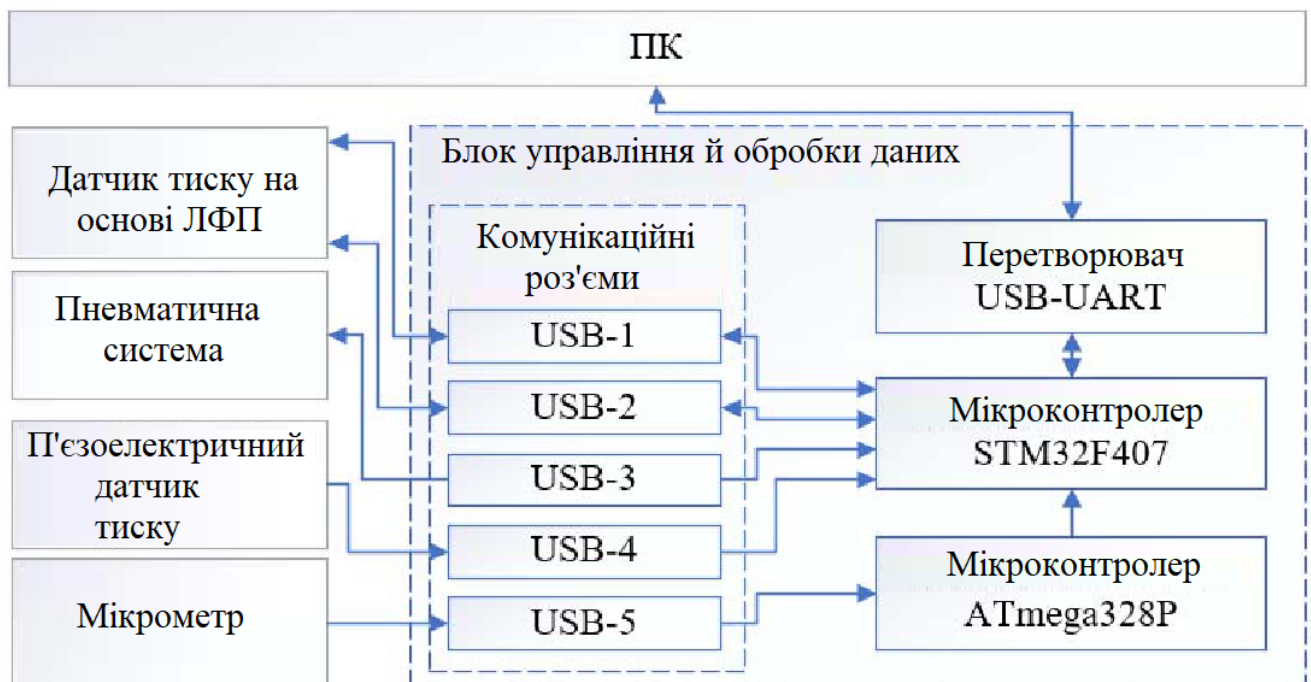


Рис. 3.6.Структурна схема блоку управління та обробки даних

Технічні дані мікроконтролера STM32F4 представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Характеристики мікроконтролера STM32F407VE

Характеристики	Значення
Серія (ядро)	stm32 f4 (ARM Cortex-M4)
Ширина шини даних	32 біт
Тактова частота	168 МГц
Кількість входів / виходів	82
Об'єм пам'яті програм	1 (1m x 8) Мбайт
Тип пам'яті програм	flash
Об'єм RAM	192k x 8
Наявність АЦП / ЦАП	АЦП 16x12b/ ЦАП 2x12b
Вбудовані інтерфейси	CAN, ETH, I <sup>2</sup> C, IRDA, LIN, SPI, UART, USBOTG
Вбудована периферія	BROWN-OUTDETECT / RESET DMA, I2S, LCD, POR, PWM, WD
Напруга живлення	1,8...3,6 В
Робоча температура	-40...+85 °C
Корпус	LQFP-100 (14 x 14)

Більш детально про конструктивні особливості блоку управління та обробки даних описано у підрозділі 3.2.2. Крайньою частиною АПК є ПК, що забезпечує збір, обробку та візуалізацію контрольованих параметрів, а також введення та передачу в блок управління та обробки даних значень змінюваних параметрів. Вимоги до ПК як апаратної частини АПК сформовані за умови підтримки середовища розробки LabVIEW та представлені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Вимоги до ПК

Операційна система	Версія	Примітка
Windows	XP, Vista, 7, 8, 10	64-бітна версія LabVIEW доступна тільки для 64-бітних версій Windows Vista і 7. 64-бітна версія Windows XP не підтримується
Linux	Red Hat Enterprise Linux WS3, Mandrake Linux/Mandriva 10.0, SuSE Linux 9.1	Ядра Linux версій 2.2.x, 2.4.x і 2.6.x архітектури Intel x86, GNU C Library (glibc) Version 2.2.4 або більш пізньої версії

Технічні дані мікроконтролера ATmega328P представлені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Характеристики мікроконтролера ATmega328P

Характеристики	Значення
Серія (ядро)	AVR ATmega
Ширина шини даних	8 біт
Тактова частота	20 МГц
Кількість входів / виходів	23
Об'єм пам'яті програм	32 кБайт (16k x 16)
Тип пам'яті програм	flash
Об'єм EEPROM	1k x 8
Об'єм	2k x 8
Наявність АЦП / ЦАП	АЦП 6x10b
Вбудовані інтерфейси	I2C, SPI, UART
Вбудована периферія	BROWN-OUTDETECT / RESET, POR, PWM, WDT
Напруга живлення	1,8...5,5 В
Робоча температура	-40...+85 °C
Корпус	dip-28 (0.300 inch)

3.2.1. Датчик тиску на основі лінійки фотоелектронних приймачів.

Досліджуваний датчик (рис.3.7, а), який складається з корпусу 1, нижнього 4 і верхнього 9 стяжних кілець, які забезпечують фіксацію мембрани 8 за допомогою стяжних гвинтів 10. До нижньої частини мембрани за допомогою гайки фіксується шторка з прорізами 5, верхня кришка датчика 12 кріпиться до верхнього фланця корпусу 1 гвинтами 12 забезпечуючи фіксацію в корпусі мембрани (рис. 3.7.).

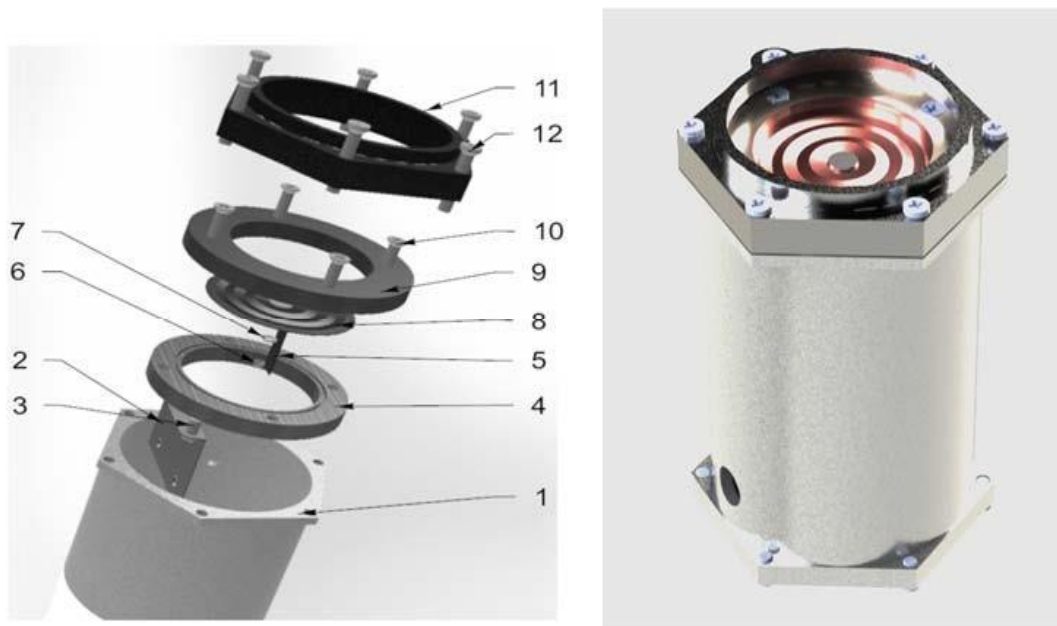
До нижнього фланця датчика за допомогою гвинтів кріпиться нижня кришка датчика. Крім того, в нижній частині датчика є два отвори для встановлення п'єзоелектричного датчика тиску та штуцера пневматичної системи.

На кронштейні 2 закріплено електронну плату (рис 3.8, а) ЛФП типу PLX554В.

Електронна плата встановлена симетрично прорізам на шторці, забезпечуючи формування оптичних плям на ЛФП від джерел оптичного випромінювання



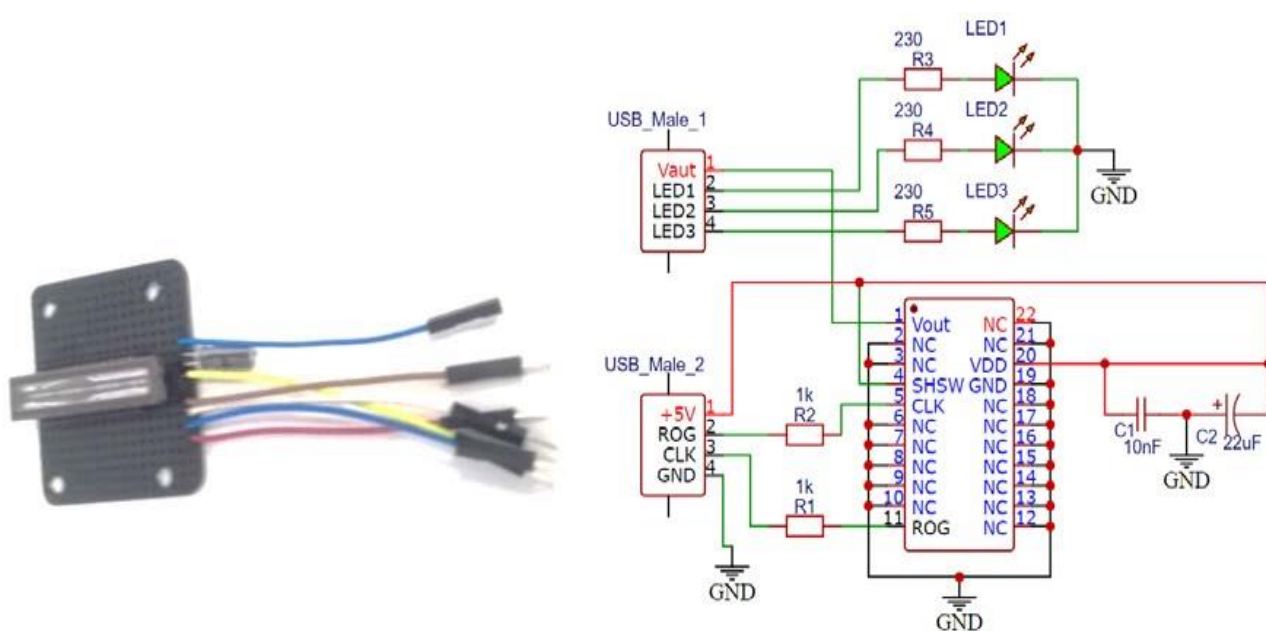
(світлодіодів) [8], розташованих на протилежній частині корпусу по відношенню до електронної плати ЛФП.



*а*

*б*

Рис. 3.7. Конструкція датчика тисків на основі ЛФП: а – 3D складальний макет; б – макет датчика в зборі; 1 – корпус датчика; 2 – кронштейн кріплення електронної плати лінійки фотоелектронних приймачів; 3 – гвинт кріплення кронштейна; 4 – нижнє стяжне кільце; 5 – шторка з прорізами; шайба, 8 – мембрана, 9 – верхнє стяжне кільце мембрани, 10 – стяжний гвинт, 11 – верхня кришка датчика, 12 – гвинт кріплення кришки



*a*

*б*

Рис. 3.8. Електрична схема датчика: *a* – плата, *б* – електрична схема датчика

3.2.2. Блок управління й обробки даних елементів та пристроїв первинної інформації комплексу.

У складі блоку управління й обробки даних використовуються мікроконтролери STM32F407VET6 та ATmega328P, призначені для роботи як вбудовані системи, що забезпечують автоматизацію процесів збору та обробки даних у складі АПК.

Функціонально, мікроконтролер STM32F407VET6 у складі АПК забезпечує:

- формування керуючих електричних імпульсів для ЛФП типу ILX554B,
- оцифрування вихідного сигналу ЛФП типу ILX 554B,
- оцифрування вихідного сигналу п'єзоелектричного датчика тиску,
- формування керуючих електричних імпульсів для елементів пневматичної системи,
- обробку вихідного цифрового сигналу мікроконтролера ATmega328P,
- математичну обробку сигналів та обмін даними з ПК.

Призначення мікроконтролера ATmega328P, як елемента АПК, перетворення протоколу DIGITAL PROTOCOL на протокол RS232. Електрична схема блоку управління й обробки даних представлена на рис. 3.10. Для підключення до блоку управління та обробки даних апаратних компонентів АПК та ПК у його складі є вузол комутації, що складається з п'яти USB роз'ємів.

### **3.3. Програмна частина апаратно-програмного комплексу**

Програмна частина цільового АПК є комплексом для обробки й інтерпретації даних, зібраних апаратною частиною.

Програмна частина включає:

- a) програмне забезпечення блоку управління та обробки даних:

- програмне забезпечення для мікроконтролера STM32F4,
- програмне забезпечення для мікроконтролера ATmega328P,
- б) програмне забезпечення персонального комп'ютера.

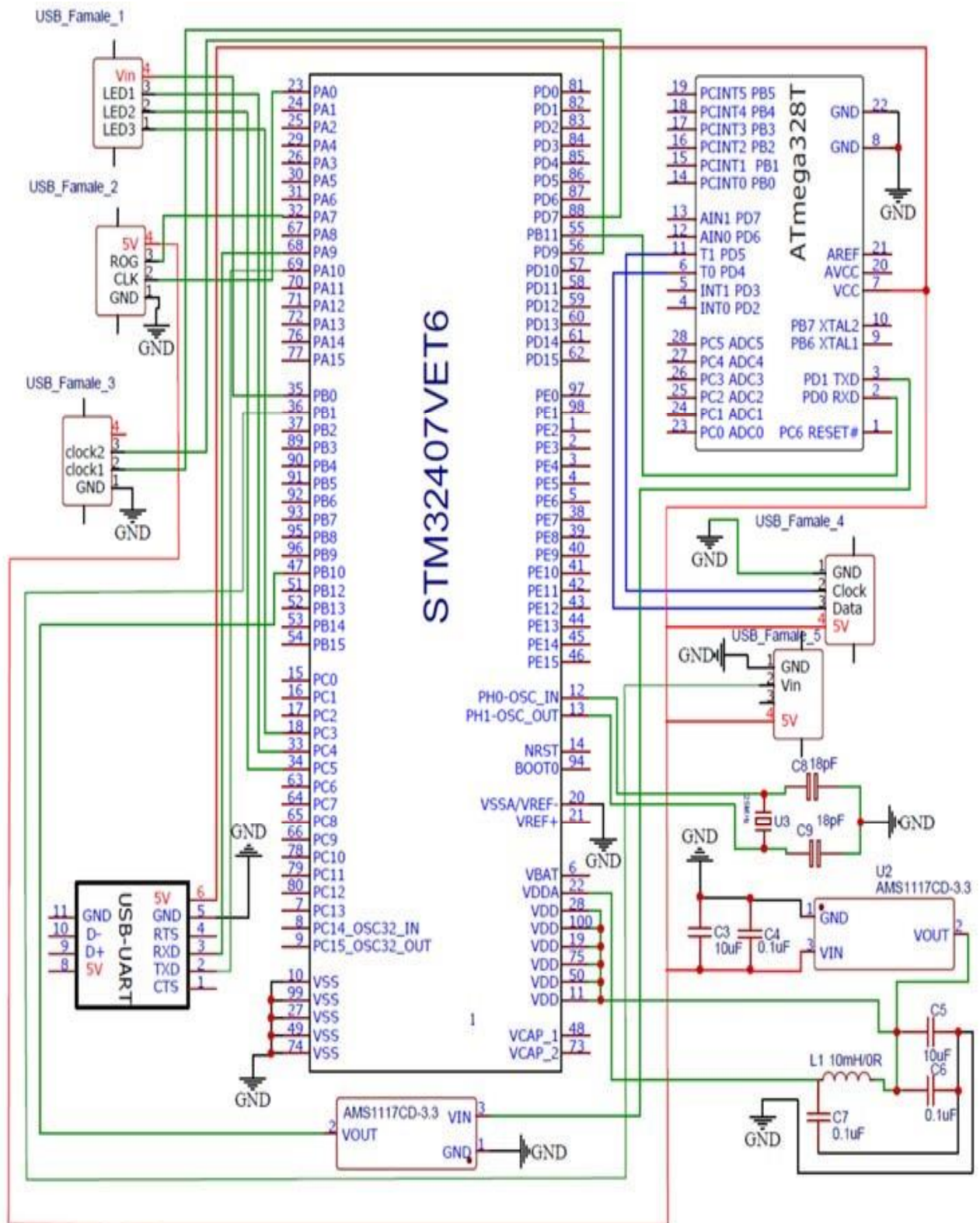


Рис.3.10.Електрична схема блоку управління та обробки даних

Принцип роботи блоку програмного забезпечення був із архітектурою АПК.

При розробці програмної частини АПК використовувалося інтегроване середовище розробки Keil uVision 5, програмування Arduino IDE та середовище LabVIEW 2016.

Принципова схема взаємодії програмного забезпечення АПК представлена на рис. 3.11.

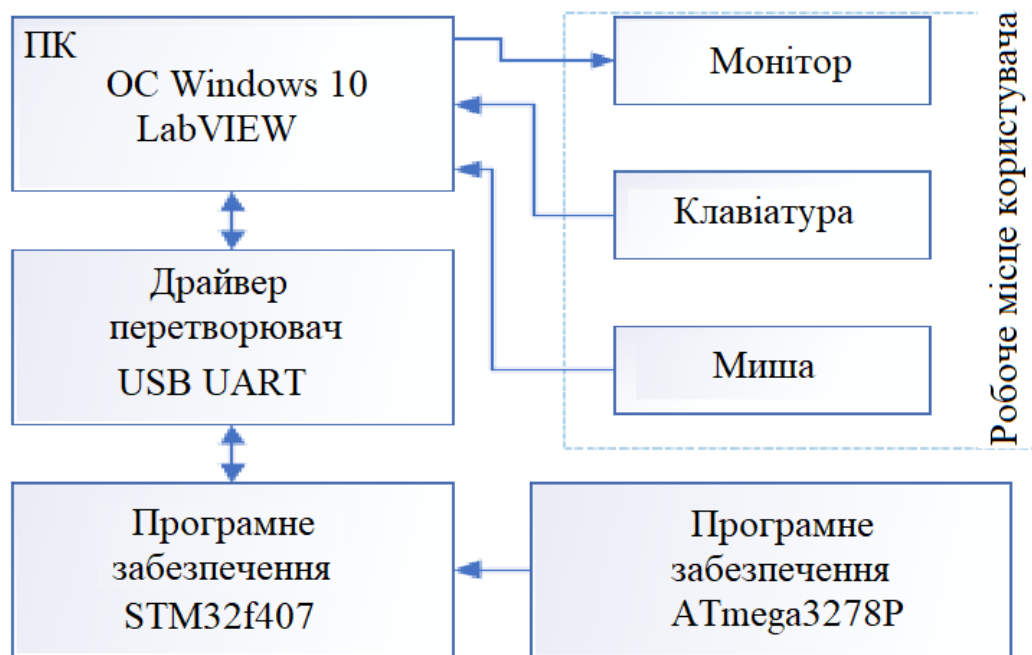


Рис. 3.11. Структурна схема взаємодії програмного забезпечення АПК

### 3.4. Теоретичні аспекти управління й обробки даних ЛФП

При проведенні досліджень з датчиком тиску на базі оптоелектронного перетворювача, використовується ЛФП типу ILX544В та мікроконтролер STM32F4.

На рис. 3.12 представлена схема управління ЛФП типу ILX544В. Відповідно до схеми, кожному імпульсу зчитування CLK відповідає сигнал з одного пікселя, що надходить на вихід ILX544В. Перед початком кожного циклу опитування ЛФП формується імпульс скидання ROG [9]. Між двома імпульсами ROG має бути така кількість імпульсів CLK, яка забезпечує зчитування всіх робочих і технічних пікселів.

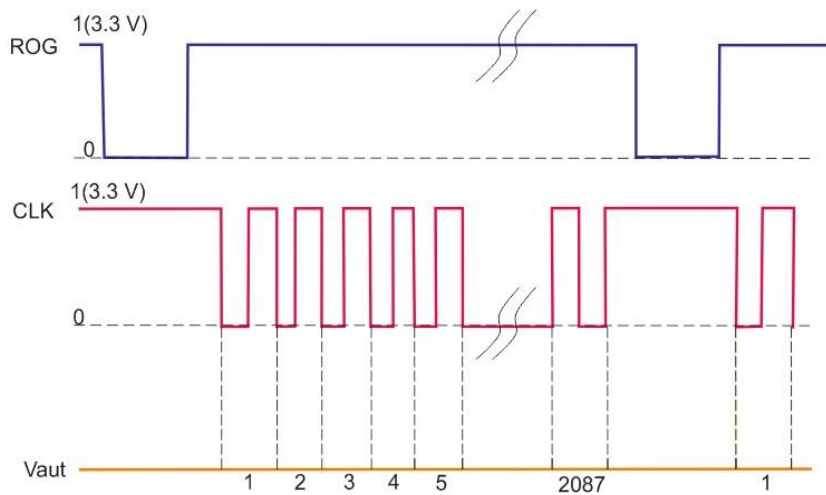


Рис. 3.12. Управління ЛФП типу ILX544B

В результаті впливу оптичних плям на поверхню ЛФП, на його виході відбувається зміна амплітуди напруги в часі. Структура вихідного сигналу  $V_{out}$  представлена рис. 3.13.

Розроблені різні способи обчислення значень тисків під час використання сигналів на виході ЛФП.

У першому способі обчислення координат світлової плями можна використовувати так званий центроїд-метод, який забезпечує обчислення значення координати центру тяжкості зображення світлової плями. Алгоритм, що реалізує дані обчислення, може бути реалізований в такий спосіб.

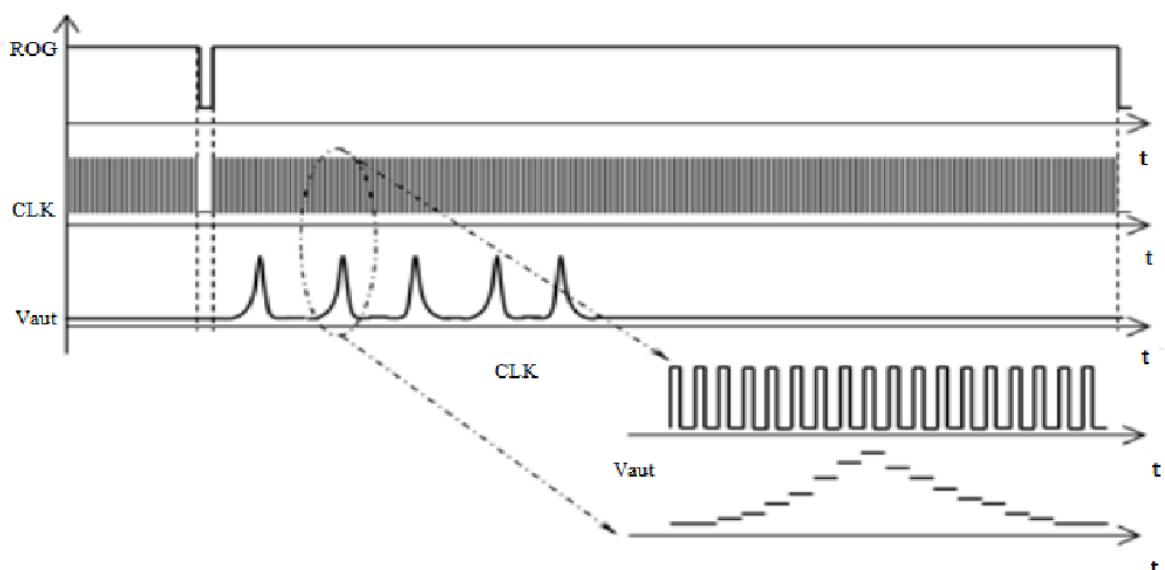


Рис. 3.13. Структура вихідного сигналу ЛФП

Спочатку визначаються номери  $n$  пікселів  $N_{\max\_n}$ , амплітуда сигналу з яких відповідає локальним максимумам у межах кожного з  $n$  світлових плям на фоточутливій поверхні ЛФП. Потім виділяється область з  $M/2$  пікселів до і  $M/2$  пікселів після максимуму. І для цієї ділянки здійснюється обчислення координати максимуму сигналу, виражене в номері пікселя, за формулою:

$$MAX_n = \frac{\sum_{i=N_{\max\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{\max\_n}+\frac{M}{2}} (A_i \times i)}{\sum_{i=N_{\max\_n}-\frac{M}{2}}^{N_{\max\_n}+\frac{M}{2}} (A_i)}, \quad (3.1)$$

де  $MAX_n$  - координата максимуму  $n$ -ї світлової плями на оптичній лінійці,  $A_i$  - амплітуда сигналу з  $i$ -го пікселя в околицях  $n$ -ї плями,  $N_{\max\_n}$  - номер пікселя, амплітуда з якого в межах  $n$ -ї плями максимальна. Кількість пікселів  $M/2$  вибирається так, щоб охопити всі пікселі навколо локального максимуму, амплітуда сигналу з яких помітно перевищує початковий (темновий) рівень.

Таким чином, в результаті обчислень в пам'яті мікроконтролера буде  $n$  значень  $MAX_n$ , що відповідають вихідному значенню координат світлових плям. При зміні статичного ( $P$ ) тиску мембрана чутливого анероїдного елемента деформуються, в результаті чого відбувається переміщення всіх світлових плям, пропорційне зміні тиску. Обчислення за формулою (3.1) нових значень координат світлових плям дозволяє визначити зміну тиску за величиною зміщення мембрани щодо вихідного значення:

$$\Delta P_n(t) = k_n \times [MAX_n(t) - MAX_n(0)], \quad (3.2)$$

де  $\Delta P_n(t)$  – поточне значення зміни тиску, визначене усуненням  $n$ -ї плями,  $MAX_n(t)$  – координата максимуму  $n$ -ї світлової плями на ЛФП у поточний момент часу  $t$ ,  $MAX_n(0)$  – вихідне значення координати  $n$ -ої світлової плями,  $k_n$  – калібрувальний коефіцієнт, що зв'язує координати  $n$ -ї плями, виражений у пікселях, зі зміною статичного тиску. З урахуванням того, що відстань між

шторкою та ЛФП набагато менша, ніж відстань між шторкою та джерелом випромінювання, значення калібрувальних коефіцієнтів  $k_n$  для всіх  $n$  світлових плям у першому наближенні можна вважати рівними. Для підвищення точності вимірювання зміщення мембрани пропонується усереднювати результати вимірювання зміни тиску, отримані для всіх плям:

$$\Delta P(t) = \frac{\sum_n P_{cm\_n}(t)}{n}. \quad (3.3)$$

*Другий спосіб* відрізняється тим, що виконується визначення координат оптичної плями заданого значення амплітуди сигналу. Алгоритм, реалізує дані обчислення, організовано в такий спосіб. Спочатку визначається номер пікселя  $N1\_n$ , амплітуда сигналу якого близька до заданого значення фронту сигналу  $i$ , аналогічно, номер пікселя  $N2\_n$  на спаді сигналу. Дані обчислення виробляються всім  $n$  світлових плямі. Центральний піксель світлової плями визначається:

$$N_{aver} = \frac{(N1\_n + N2\_n)}{2}. \quad (3.4)$$

Потім виділяється область з  $M/2$  пікселів до  $M/2$  пікселів після  $N_{aver}$ .

Перетворивши вираз (3.1) отримали:

$$MAX_n = \frac{\sum_{i=N_{aver}_n - \frac{M}{2}}^{N_{aver}_n + \frac{M}{2}} (A_i \times i)}{\sum_{i=N_{aver}_n - \frac{M}{2}}^{N_{aver}_n + \frac{M}{2}} (A_i)}, \quad (3.5)$$

де  $N_{aver}_n$  – номер центрального пікселя  $n$ -ї світлової плями.

*У третьому способі* для обчислення координат світлової плями можна використовувати для вимірювання зміщення плям по відношенню до першого пікселя ЛФП.

Алгоритм, що реалізує дані обчислення, може бути реалізований в такий спосіб. Спочатку визначаються номери  $n$  пікселів  $N_{max\_n}$ , амплітуда сигналу з яких відповідає локальним максимумам у межах кожного з  $n$  світлових плям на



фоточутливій поверхні ЛФП. Далі, при обчисленні нових значень  $N_{\max\_n}$  дозволяє визначити зміну тиску за величиною зміщення мембрани щодо вихідного значення:

$$\Delta P_n(t) = k_n \cdot [N_{\max\_n}(t) - N_{\max\_n}(0)], \quad (3.6)$$

де  $\Delta P_n(t)$  – поточне значення вимірюваного тиску, що визначається зміщеннями  $n$ -ї плями,  $N_{\max\_n}(t)$  – координата максимуму  $n$ -ї світлової плями на ЛФП в поточний момент часу  $t$ ,  $N_{\max\_n}(0)$  – вихідне значення координати  $n$ -ї світлової плями - калібрувальний коефіцієнт, що зв'язує координати  $n$ -ї плями, виражений у пікселях, зі зміною статичного або повного тиску.

*Четвертий спосіб*, відрізняється тим, що визначається номер пікселя  $N_n$ , амплітуда сигналу якого близька до заданого значення фронту (або на спаді) сигналу. Дані обчислення виробляються для всіх  $n$  світлових плям.

Далі обчислення нових значень  $N_n$  дозволяє визначити зміну тиску за величиною зміщення мембрани щодо вихідного значення:

$$\Delta P_n(t) = k_n \cdot [N_n(t) - N_n(0)], \quad (3.7)$$

де  $\Delta P_n(t)$  – поточне значення вимірюваного тиску, що відповідає зміщенню  $n$ -ї плями,  $N_n(t)$  – координата максимуму  $n$ -ї світлової плями на ЛФП в поточний момент часу  $t$ ,  $N_n(0)$  – вихідне значення координати  $n$  - калібрувальний коефіцієнт, що зв'язує координати  $n$ -ї плями, виражений у пікселях, зі зміною статичного або повного тиску.

*У п'ятому способі* для обчислення координат світлової плями можна використовувати часове зміщення  $Tn$  від початку опитування ЛФП до  $n$ -ї оптичної плями. Далі, обчислення нових значень,  $Tn$  дозволяє визначити зміну тиску за величиною часового зміщення щодо вихідного значення:

$$\Delta P_n(i) = k_n \cdot [Tn(i) - Tn(0)], \quad (3.8)$$

де  $\Delta P_n(i)$  – поточне значення вимірюваного тиску, визначене часовим зміщенням  $n$ -ї плями,  $Tn(i)$  – часове зміщення до  $n$ -ї світлової плями на ЛФП у поточному циклі  $i$ ,  $Tn(0)$  – вихідне часове зміщення,  $k_n$  – калібрувальний коефіцієнт, що зв'язує координати  $n$ -ї плями, виражений у пікселях, зі зміною статичного та повного тисків.

### **3.5. Розробка алгоритмів управління та обробки даних лінійки фотоелектронних приймачів**

Завдання з управління та обробки даних ЛФП покладено на мікроконтролер STM32F4 та його програмне забезпечення. Виходячи з принципу дії ЛФП, при реалізації алгоритму управління та обробки даних вирішено дві задачі: формування керуючих імпульсів та обробки даних [4].

Важливим завданням розробки алгоритмів управління і обробки сигналу, що надходить з ЛФП, є синхронізація імпульсів CLK і перетворень АЦП. Саме точність синхронізації визначатиме точність та повторюваність експерименту.

Далі розглянемо різні варіанти здійснення цього завдання. Принцип реалізації програмного забезпечення мікроконтролера STM32F4 представлений у вигляді спрощеної блок-схеми рис. 3.14.

На рис. 3.14, а представлена блок-схема логіки роботи арифметично-логічного пристрою (далі – АЛУ) мікроконтролера. Умовно виділено три програмні модулі, кожен із яких виконує свою функцію.

Програмний модуль 1 виконує обробку даних, отриманих після оцифрування сигналу з ЛФП.

Програмний модуль 2 виконує запуск перетворення аналогового сигналу з п'єзоелектричного датчика тиску цифровий код зі збереженням його значень.

Програмний модуль 3 здійснює передачу даних на ПК з використанням контролера універсального асинхронного приймача (далі - УАПП) з використанням контролера прямого доступу до пам'яті (далі - ПДП).

На рис. 3.14, б представлено перелік задіяних подій контролера вкладених векторних переривань (далі – КВВП). При цьому, залежно від алгоритму керування та обробки аналогового сигналу ЛФП, який з них можуть не використовуватися. З цієї причини змінюється програмний модуль 1, тоді як програмні модулі 2 і 3 залишаються незмінними.



Рис. 3.14. Принцип реалізації програмного забезпечення мікроконтролера STM32F4: а – логіка роботи АЛУ, б – активні переривання

### 3.6. Датчик статичного та повного тисків на основі оптоелектронного перетворювача

Для вирішення завдань, що забезпечують підвищення точності вимірювань статичного та повного тисків, зниження електроспоживання, зниження масогабаритних параметрів, розширення функціональних можливостей джерел первинної та вторинної інформації та підвищення динамічної стійкості датчиків тисків, розроблено варіанти конструкцій датчиків тисків на основі оптоелектронного перетворювача.

Перша конструкція датчика статичного та повного тисків, що використовує оптоелектронний перетворювач [6], представлена на рис. 3.15. Конструкція датчика містить корпус 1 з двома отворами, відповідно для вимірювання статичного ( $P$ ) і повного ( $P^*$ ) тисків, причому отвори розташовані вище і нижче зазору, утвореного мембранами 2 і 3. Мембрани 2 і 3 чутливого анероїдного елемента герметично по периметру прикріплені до корпусу та рознесені по висоті, утворюючи зазор, з якого викачано повітря. Всередині безповітряного зазору до стійки 4 прикріплено джерело випромінювання 5 і дві шторки 7 з прорізами 8. Дві ЛФП 6 кріпляться відповідно до верхньої та нижньої мембран 2 і 3, причому зазначені ЛФП звернені до відповідних прорізів шторок 7.

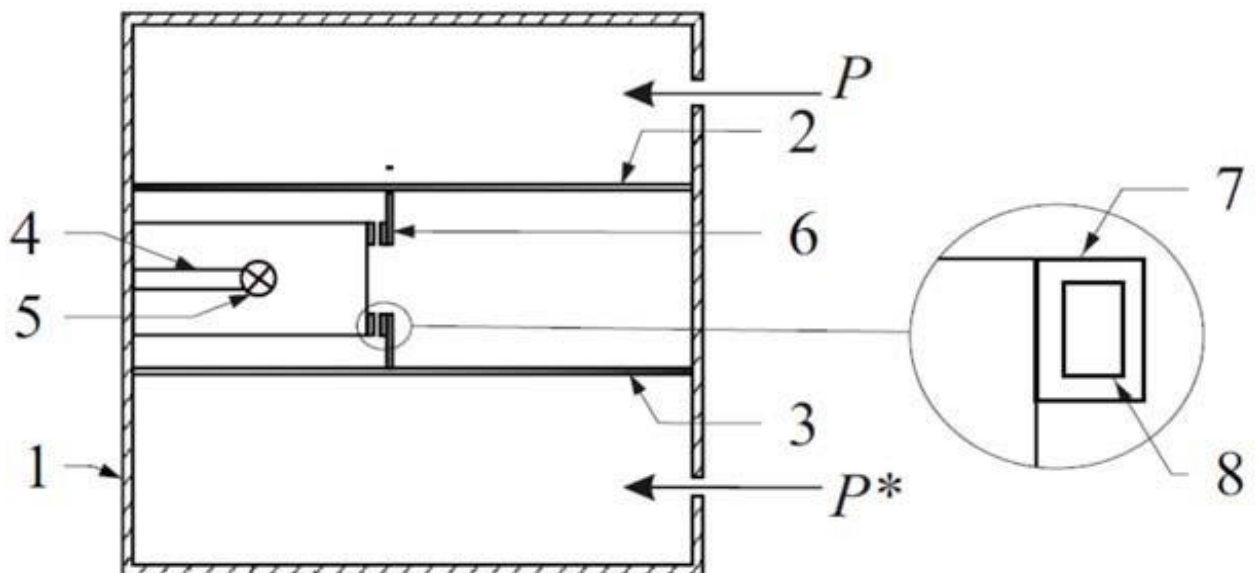


Рис.3.15. Датчик тиску, що використовує оптоелектронний перетворювач: 1 - корпус з двома отворами, 2 і 3 - мембрани, 4 - стійка, 5 - джерело випромінювання, 6 - ЛФП, 7 - шторка, 8 - прорізи

Робота датчика здійснюється в такий спосіб. У вихідному стані мембрани 2 та 3 ПЧЕ займають певне положення. Оптична енергія від джерела випромінювання через 5 прорізи шторок 7 потрапляє, у вигляді оптичних плям, на ЛФП 6, які прикріплені до верхньої і нижньої мембран 2 і 3.

У ЛФП 6 окремі фоточутливі елементи (пікселі) розташовані вздовж однієї координати. Принцип роботи даних пристроїв полягає у формуванні всередині кожного пікселя електричного сигналу, пропорційного поглиненій ним оптичній енергії. Досягається це завдяки фоточутливому *p-n* переходу (як і звичайному фотодіоді), через який відбувається розряд конденсатора оптичного елемента. Чим більше оптична потужність, що потрапляє на піксель, тим більше буде струм фотодіода і, отже, тим швидше буде розряджатися конденсатор. Наприкінці циклу виміру відбувається зчитування залишкового заряду конденсаторів пікселів.

При зміні статичного ( $P$ ) та (або) повного ( $P^*$ ) тисків, мембрани 2 і 3 деформуються, при цьому ЛФП 6, прикріплені до верхньої та нижньої мембран 2 і 3 зміщуються, викликаючи зміщення на них оптичних плям від джерела випромінювання 5 через прорізи 8 шторок 7. При послідовному опитуванні пікселів на виході ЛФП формуватиметься електричний сигнал, у якого зміна амплітуди в часі відображає розподіл оптичної потужності простору ЛФП. Іншими словами, на виході ЛФП формуватимуться цифрові сигнали, пропорційні відповідно до статичного і повного тисків.

Пропонована конструкція датчика тисків позбавлена недоліків аналогів наведених у першому розділі даної роботи, зокрема, висока чутливість ЛФП вимагає мінімальної деформації пружного елемента, що дозволить позбавитися цілого ряду похибок: залишкової деформації, нелінійності, пружних недосконалостей матеріалу, температурних коливань, температурних коливань, Від впливу вібрацій, від зміни властивостей матеріалу з часом і т.п. Безконтактне знімання інформації та робота інформаційної системи в умовах вакууму значно підвищать ефективність процесів вимірювання. Відзначимо також значне зменшення споживання енергії.

### 3.7. Датчик статичного та повного тисків на основі оптоелектронного перетворювача з двоступінчастим ПЧЕ

Друга конструкція датчика статичного та повного тисків, що використовує оптоелектронний перетворювач із двоступеневим ПЧЕ [4], представлена на рис. 3.16.

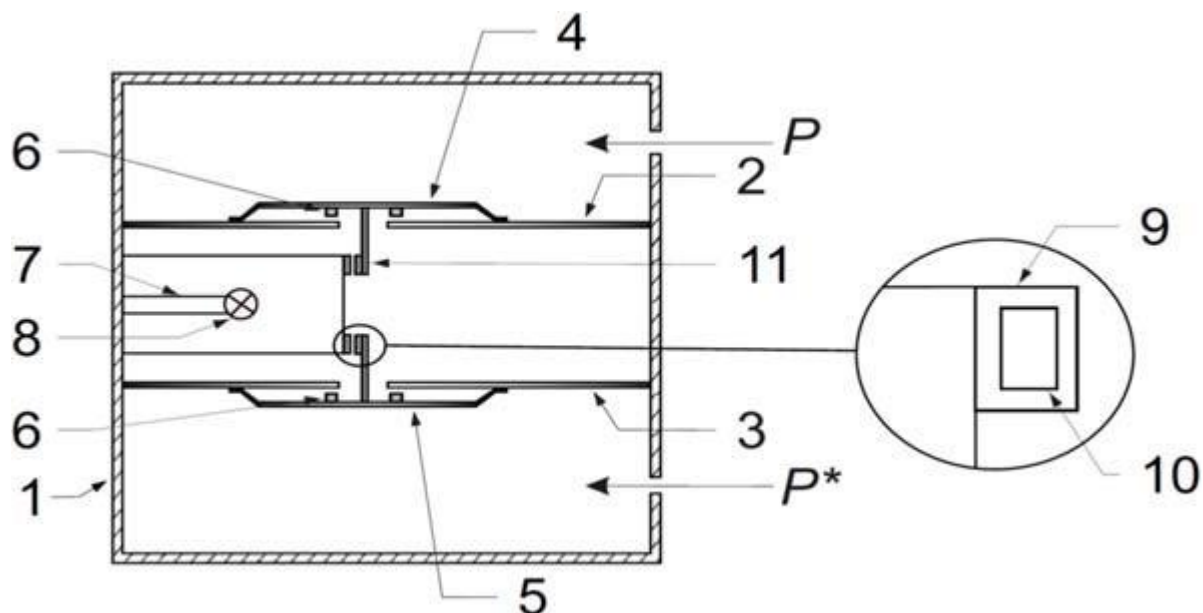


Рис. 3.16 .Датчик статичного та повного тисків на основі оптоелектронного перетворювача з двоступінчастим ПЧЕ: 1 – корпус з двома отворами, 2 та 3 – мембрани другого ступеня, 4, 5 – мембрани першого ступеня, 6 – кільцеві упори, 7 – стійка, 8 – джерело випромінювання, 9 - шторка, 10 - проріз, 11 - ЛФП

Датчик містить корпус 1 з двома отворами, відповідно для вимірювання статичного (P) та повного (P\*) тисків. Основні мембрани 2 і 3 рознесені по висоті і герметично по периметру прикріплені до корпусу, утворюючи зазор, з якого видавлено повітря. Отвори для вимірювання статичного та повного тисків розміщені вище і нижче зазору. У геометричних центрах мембран 2 і 3 виконані отвори, які із зовнішніх сторін мембран, по відношенню до зазору, перекриваються додатковими верхньою 4 і нижньою мембранами 5, герметично по периметру прикріплені до зовнішніх сторін основних мембран і мають кільцеві упори 6. Додаткові мембрани 4 і 5 мають меншу, порівняно з основними

2 і 3 жорсткість, а отже, більшу чутливість. Всередині безповітряного зазору до стійки 7 прикріплені джерело випромінювання 8, а також верхня і нижня шторки 9 з прорізами 10. Дві ЛФП 11 кріпляться до 4 верхньої і нижньої 5 додатковим мембранам.

При зміні статичного ( $P$ ) та (або) повного ( $P^*$ ) тисків мембрани 2, 3, 4 і 5 УЧЕ деформуються, при цьому ЛФП 11, прикріплені до верхньої 4 і нижньої 5 додаткових мембран, зміщуються, викликаючи переміщення на них оптичних плям від джерела випромінювання через 8 прорізи 10 шторок. Додаткові мембрани 4 і 5, що мають велику чутливість, починають зміщуватися вже при тисках, які не сприймаються основними мембранами 2 і 3, а останні почнуть інтенсивно зміщуватися лише після того, як кільцеві упори 6 додаткових мембран 4 і 5 упруться у зовнішні поверхні основних мембран 2 і 3.

Пропонована конструкція датчика дозволяє значно підвищити точність вимірювання тиску, що нелінійно змінюється (статичного і повного), а також підвищити чутливість датчиків тиску у всьому діапазоні вимірюваних тисків.

### **Висновки з третього розділу**

Таким чином, третій розділ роботи присвячений розробці установки у вигляді АПК, що включає набір апаратних та програмних засобів, що забезпечують автоматизацію процесу експериментальних досліджень датчика тисків на основі ЛФП.

У ході роботи вирішені такі завдання:

- виконаний підбір апаратних компонентів,
- реалізовано схемотехнічні рішення, що забезпечують узгодження аналогових та цифрових логічних рівнів між апаратними компонентами АПК та їх комутацію,
- розроблена конструкція датчика тисків на основі ЛФП,
- розроблені способи обчислення координат світлової плями,

–розроблені алгоритми для управління та обробки даними ЛФП з використанням як генератор синхроімпульсів зовнішні переривання АЦП,

–розроблені конструктивні схеми датчиків тисків на базі оптоелектронного перетворювача, отримані шляхом інтеграції високочутливого вторинного перетворювача та пружних мембран, та пристроїв управління деформаціями, заснованих на законах магнітного тяжіння та забезпечують підвищення точності вимірювання.

Практичною значимістю розроблених методів та алгоритмів управління мікроконтролером, що забезпечують обробку вихідних сигналів ЛФП при вимірюванні лінійних переміщень жорсткого центру пружного чутливого елемента, може бути можливість їх використання в аналогічних вимірювальних системах лінійних переміщень.



## ВИСНОВОК

У результаті вирішення поставлених завдань досягнуто мети роботи та отримано такі результати:

1. Розроблено високоточний датчик статичного та повного тисків, що використовує оптоелектронний перетворювач на основі ЛФП як вторинний перетворювач, що дозволило мінімізувати амплітуду деформацій ПЧЕ, а безконтактний спосіб знімання інформації та робота інформаційної системи в умовах вакууму дозволили підвищити ефективність процедур вимірювання тисків.

2. Розроблено методику розрахунку ПЧЕ, принциповою відмінністю якої є облік технічних характеристик вторинного перетворювача, зокрема, порога чутливості вторинного перетворювача та прогину центру мембрани до функцій координати пікселя ЛФП. Крім того, розроблено алгоритм та програму мовою програмування C/C++, що реалізують алгоритм розрахунку ПЧЕ.

3. Для вимірювання значень деформацій ПЧЕ (мембран) датчика тиску було розроблено програму управління мікроконтролерами сімейства STM32F4. Використання даної програми дозволило суттєво підвищити точність обчислень деформації мембран датчика тисків, що використовують оптоелектронні перетворювачі, за рахунок того, що при опитуванні одного пікселя ЛФП аналого-цифровий перетворювач здійснює подвійне перетворення.

4. Порівняльні результати визначення прогинів мембрани, отримані аналітичним методом, з використанням програмного комплексу ANSYS та експериментальні дані показали, що похибка визначення прогину жорсткого центру мембрани, отриманих аналітичним та експериментальним методами не перевищує 15%, що слід визнати задовільним. Порівняльна похибка результатів силового розрахунку з використанням програмного комплексу ANSYS та відомими експериментальними даними не перевищила 9%.

5. Розроблено методику обчислення положення жорсткого центру пружної мембрани, що використовує процес розгалуження вихідної інформації шляхом застосування шторок з  $n$  щілинами, що дозволяє сформувавши на ЛФП оптичних плям, що переміщуються у функції вимірюваного тиску. Завдяки цьому за один період опитування лінійки вдається отримати  $n$  незалежних значень вимірюваного тиску  $i$ , усереднивши результат, підвищити точність вимірювання, а також звести до мінімуму вплив зовнішніх факторів, що обурюють, зокрема, вібрацій.

6. Розроблено апаратно-програмний комплекс, що включає алгоритми управління та обробки даними та експериментальну конструкцію датчика тисків, що використовує оптоелектронний перетворювач на базі ЛФП типу ILX554B. Запропоновано алгоритми та розроблено програми управління мікроконтролером, які забезпечують, при вимірюванні лінійних переміщень жорсткого центру мембран, обробку сигналів з виходу ЛФП при впливі на нього однієї та двох оптичних плям.

7. Визначено метрологічні характеристики датчиків тисків, причому як критерійний параметр для оцінки характеристик точності розроблених датчиків тисків використана точність вимірювання положення геометричного центру ПЧЕ. Встановлено, що підвищення точності вимірювань досягається за рахунок усереднення результатів вимірювань, так і за рахунок використання двох оптичних плям. Наведена похибка вимірювання положення геометричного центру при частоті вимірів 50 Гц становить трохи більше 0,008% до максимального прогину ПЧЕ.

8. Розроблено гаму нових датчиків статичного та повного тисків із цифровим вихідним сигналом та зі зменшеною похибкою у широкому діапазоні вимірюваних тисків, на базі комплексного використання конструктивних та схемотехнічних рішень визначення параметрів ПЧЕ з урахуванням технічних характеристик вторинного перетворювача, розгалуження вихідної інформації, а також нових алгоритмів .

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Barber, J.R. Elasticity, Second Edition / J.R. Barber. – Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 431 pp.
2. Auersvald, J. Aerometric system for general aviation / J. Auersvald, K. Draxler // Intern. Conf. on Military Technologies (ICMT). Brno, Czech Republic. – 2015. – P. 1-6.
3. Ciarlet, P.G. An introduction to differential geometry with applications to elasticity / P.G. Ciarlet. – Springer, 2005. – 211 pp.
4. Elbestawi M.A. Force Measurement / M.A. Elbestawi // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – 1999. – P. 600-615.
5. Dereniak, E. L. Optical radiation detectors / E. L. Dereniak, D.G. Crow. – NY: Wiley, 1984. – 320 p.
6. Rieger, M.O. A model for hysteresis in mechanics using local minimizers of Young measures / M.O. Rieger // Progress in nonlinear differential equations and their applications. – 2005. – Vol. 63. – P. 403-414.
7. Prudenziati M. Handbook of Sensors and Actuators Thick Film Sensors (vol. 1) / M. Prudenziati. – University of Modena:ELSEVER, 1994.
8. Nyce, D.S. Linear position sensors: theory and application / D.S. Nyce, // John Wiley & Sons Inc. – 2004. – P. 179.
9. Elbestawi, M.A. Force measurement / M.A. Elbestawi // In The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook; Webster, J.G., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 1999. – P. 23.1-23.17.
10. Fischer, J. Simple Device for Small Dimension Measurement Using CCD Sensor / J. Fischer, V. Haasz, T. Radil // 12th IMEKO TC4 International Symposium. – 2002. – P. 433-437.
11. ANSYS Structural Analysis Guide: ANSYS Release 9.0 [Електронийресурс]  
URL: <http://www.ansys.com>

12. ANSYS Tutorials - the University of Alberta Mechanical Engineering department [Електронийресурс] URL: <http://www.mece.ualberta.ca/Tutorials/ansys/index.html>
13. Гарантії прав громадян на охорону праці – WikiLegalAid. Платформа правових консультацій - WikiLegalAid. URL: [https://wiki.legalaid.gov.ua/index.php/Гарантії\\_прав\\_громадян\\_на\\_охорону\\_праці](https://wiki.legalaid.gov.ua/index.php/Гарантії_прав_громадян_на_охорону_праці).
14. Закон України "Про охорону праці". URL: <https://pon.org.ua/ohorona-praci/72-zakon-pro-okhoronu-praci.html>.
15. Організація робочого місця оператора. URL: <http://um.co.ua/14/14-5/14-59948.html>.
16. Ультразвук. URL: [https://studopedia.com.ua/1\\_14275\\_ultrazvuk.html](https://studopedia.com.ua/1_14275_ultrazvuk.html).
17. Пам'ятка для тих, хто працює в умовах підвищеної температури повітря - Охорона праці і пожежна безпека. Охорона праці і пожежна безпека. URL: <https://oppb.com.ua/news/pamyatka-dlya-tyh-hto-pracyuye-v-umovah-pidvyshchenoyi-temperature-povitrya>.
18. Методика дослідження освітлення виробничих приміщень. URL: <https://1snau.com/metodika-doslidzhennya-osvitlennya-virobnichix-primishhen-4/>.
19. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text>.
20. Основні вимоги до виробничого освітлення. Бібліотека економіста. URL: <https://library.if.ua/book/29/1951.html>.
21. Охорона праці та цивільний захист лабораторний практикум. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48197/1/Okhorona\\_pratsi\\_tsyvilnyi\\_zakhyst.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48197/1/Okhorona_pratsi_tsyvilnyi_zakhyst.pdf).
22. Профілактика пожеж. URL: <https://nagrada.gov.ua/profilaktika-pozhezh/>.
23. Первинні засоби гасіння пожеж. URL: <http://um.co.ua/7/7-16/7-163124.html>.
24. Первинні засоби пожежогащення. URL: <http://norma.org.ua/document/legislation/law58/43.php>.

25. Вибір та визначення необхідної кількості вогнегасників. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/8968088/page:15/>.
26. Засоби методизахистувідшуму. URL: [http://ni.biz.ua/2/2\\_10/2\\_108812\\_sredstva-i-metodi-zashchiti-ot-shuma.html](http://ni.biz.ua/2/2_10/2_108812_sredstva-i-metodi-zashchiti-ot-shuma.html).
27. Організація робочого місця оператора. URL: <http://um.co.ua/14/14-5/14-59948.html>.
28. Автоматизація систем вентиляції. шкафи управління вентиляцією. Електротехнічна Компанія. URL: <https://ielectro.com.ua/avtomatizatsiya-ventilyatsii/>.
29. Зміна клімату в Україні та світі: причини, наслідки та рішення для протидії. Екодія. URL: <https://ecoaction.org.ua/zmina-klimatu-ua-ta-svit.html>.