

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_»\_\_\_\_\_20 р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**з напрямку підготовки 6.051003 «Приладобудування»**

**на тему: «Прилад для вимірювання електростатичного поля»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи ПК-51

Вакулук Андрій Анатолійович \_\_\_\_\_

Керівник:

к.т.н доцент

Баженов В.Г. \_\_\_\_\_

Консультант з розділу «Графічний»

асистент

Богдан Г.А. \_\_\_\_\_

Рецензент: \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	2	
2	A4	ПК 510200.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	58	
3	A1	ПК 510200.01.000 Е2	Схема електрична функціональна	1	
4	A1	ПК 510200.02.000 Е3	Схема електрична принципова	1	
5	A2	ПК 510200.00.100 СК	Складальне креслення	1	
6	A3	ПК 510200.00.101	Корпус	1	
7	A3	ПК 510200.00.102	Крильчатка	1	

				ПК 510200 00.000.00	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Вакулук А.А.			Лист	Листів
Керівн.	Баженов В.Г.			1	1
Консульт.	Богдан Г.А			КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-51	
Н/контр.	Лашко О.В.				
Зав.каф.	Протасов А.Г.				

**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту  
на тему: «Прилад для вимірювання електростатичного  
поля»**

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.051003  
«Приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Протасов А.Г.

«\_\_\_»\_\_\_\_\_ 20 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студенту**

**Вакулюк Андрій Анатолійович**

1. Тема проекту «Прилад для вимірювання електростатичного поля», керівник проекту Баженов Віктор Григорович, к.т.н, затверджені наказом по університету від «27» травня 2019 р. № 1384-с

2. Термін подання студентом проекту 10 травня 2019

3. Вихідні дані до проекту: метод вимірювання електростатичного поля, границі вимірювання, дистанційна передача даних, малогабаритність;

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Розрахункова частина

3. Вибір елементів функціональної схеми

Висновок

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 5 креслеників

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична функціональна

3 –Складальний кресленик

4 – Корпус

5 – Крильчатка

6. Консультанти розділів проекту\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	асистент Богдан Г.А.		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Формулювання завдання проекту	15.03.2019	
2	Проведення аналітичного огляду	10.04.2019	
3	Підбір компонентів	25.04.2019	
4	Розрахунок компонентів	15.05.2019	
5	Розробка креслеників	12.06.2019	

Студент

Вакулюк А.А.

Керівник проекту

Баженов В.Г.

\_\_\_\_\_

## Анотація

Дипломний проект складається з 58 сторінок, 29 ілюстрацій, 41 формули, 34 літературних джерел.

**Ключові слова:** електростатика, електростатичне поле, вимірювання електростатичного поля, флюксометр, ротаційний метод, динамічний метод, статичний метод.

Впродовж дипломного проекту було розглянуто і проаналізовано існуючі методи та засоби вимірювання електростатичного поля. Було розраховано час за який різні методи вимірюють електростатичне поле, та висвітлено різницю між цими методами. Також було спроектовано пристрій на базі динамічного(ротаційного) методу з покращеннями його параметрів, а саме розмірів, роботи від батарейки і додавання елемента для передачі даних в цифровому вигляді на віддалені ПК, для подальшої обробки, збереження та візуалізації у вигляді графіків. Також було створено мікросхему та обрано сучасні елементи для неї. Зроблено висновки щодо доцільності вимірювання електростатичного поля в різних галузях.

**Мета роботи:** аналіз існуючих методів та засобів вимірювання електростатичного поля та створення приладу для його вимірювання.

**Об'єкт дослідження:** процес вимірювання електростатичного поля.

**Предмет дослідження:** методи вимірювання електростатичного поля.

**Наукова новизна:** малогабаритний пристрій для вимірювання електростатичного поля та можливість передачі даних в цифровому вигляді на віддалені ПК.

## Abstract

The diploma project consists of 58 pages, 29 illustrations, 41 formulas, 34 literary sources.

**Key words:** electrostatics, electrostatic field, electrostatic field measurements, fluxometer, rotary method, dynamic method, electric field, static method.

During the diploma project, existing methods and instruments for measuring the electrostatic field were analyzed. It was calculated time for which different methods measure the electrostatic field, and highlighted the difference between those methods. A device was also designed on the basis of dynamic (rotational) method with improvements in its parameters, namely size, battery work, and the addition of an element for digital data transfer to remote PCs for further processing. A chip was also created and the items for it were selected. Conclusions regarding the expediency of measuring the electrostatic field in different fields are made.

**Purpose:** the analysis of existing methods and means of measuring the electrostatic field and the creation of an instrument for its measurement.

**The object of research:** the process of measuring the electrostatic field.

**Subject of research:** methods of measuring the electrostatic field.

**Scientific novelty:** a small-sized device for measuring electrostatic field and the possibility of digital data transmission to remote PCs.

## **Скорочення та позначення**

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

НК – неруйнівний контроль.

ЕП – електричне поле.

ЕРС – електрорушійна сила.

ВСП – вихрострумний перетворювач.

ОК – об'єкт контролю.

ВП – впливаючий параметр.



## ЗМІСТ

<b>Вступ .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Аналітичний огляд.....</b>	<b>10</b>
1.1. Електростатичне поле .....	10
1.2. Огляд електричного методу неруйнівного контролю .....	11
1.3. Огляд вихрострумowego методу неруйнівного контролю .....	13
1.4. Огляд принципу дії вихрових струмів у НК.....	15
1.5. Фізичні основи побудови вимірювачів електричного поля .....	18
1.6. Огляд існуючих методів вимірювання постійного ЕП.....	21
1.7. Огляд існуючих засобів вимірювання постійного ЕП.....	24
1.7.1. Прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу з екраном що обертається.....	24
1.7.2. Прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу з вібруючим електродом.....	29
1.7.3. Інші прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу	34
1.8. Модель електростатичного флюксметра .....	36
1.9. Моделювання зміни ємності сенсора динамічного флюксметра за допомогою методу кінцевих елементів .....	41
2. Розрахункова частина .....	47
3. Вибір елементів функціональної схеми .....	50
3.1. Вибір підсилювача .....	51
3.2. Вибір мікроконтролера .....	52
3.3. Вибір дисплея.....	54
Висновок .....	55
Список літератури.....	56

					<i>ПК51.02.0000.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Вакулюк А.А.</i>			<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Баженов В.Г.</i>						
<i>Реценз.</i>						<i>НТУУ «КПІ», ПБФ</i>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

## Вступ

Почавшись ще у дев'ятнадцятому сторіччі вимірювання постійних та низькочастотних електричних полів використовувались при кліматичних дослідженнях, геологічних, атмосферних, системах захисту від розряду у промисловості. І незважаючи на настільки давню історію та різноманіття застосувань електростатичні вимірювання не забезпечені в повній мірі приладами та стандартами.

Вчені ще з давніх часів почали цікавитися вимірюванням електростатичних полів в атмосфері. Зокрема використовуючи механічні електроскопи такими вимірюваннями займалися М.В. Ломоносов та Г.В. Ріхман.

При вимірюваннях напруженості електростатичних полів в атмосфері було встановлено, що це значення залежить не тільки від часу вимірювання (дня чи ночі) чи висоти над землею а і від місця на земному шарі де це відбувається.

Проблема вимірювання електростатичного поля виникає в різних напрямках промисловості наприклад з використанням синтетичних матеріалів де може накопичуватися електричний заряд, що може призвести до непередбачуваних наслідків. На деяких об'єктах, наприклад на літаках підчас польоту, електричні поля можуть сягати небезпечних значень при наближенні літака до землі чи до іншого об'єкта з протилежним зарядом. Останнім часом це почало хвилювати і космічну галузь через небезпечність електричних полів в місцях запуску ракет. Також через стрімкий ріст появи ліній електропередачі, на яких рівні передач напруги можуть сягати 1000 кВ, привело до необхідності вивчення впливу низькочастотних полів як на людей так і на довкілля.

Найбільш інформативний параметр ЕП – напруженість. Більшість існуючих вимірювачів ЕП розраховані на вимірювання напруженості ЕП промислової частоти (50Гц і вище) або для вимірювання надвисоких полів та мають похибку вимірювання в межах 15-20%. Також труднощі при вимірюванні ЕП пов'язані з впливом самого датчика ЕП на результат вимірювання.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вказані проблеми в основному пов'язані з вимірами дуже високих значень електричної напруженості. Вирішення цих проблем потребує спеціальних методів та апаратури.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

# 1. Аналітичний огляд

## 1.1. Електростатичне поле

Поле, яке створене нерухомими і незмінними в часі електричними зарядами називається електростатичним. Електростатичне поле є особливим видом матерії, пов'язаної з електричними зарядами та передає дії зарядів один на одного.

В кожній точці системи заряджених тіл існує силове електричне поле. Його визначають силою, що діє на пробний точковий заряд, поміщений в це поле. Пробний заряд повинен бути мізерно малим, щоб не вплинути на характеристику електростатичного поля.

Основними характеристиками електростатичного поля є:

- Напруженість
- Електростатичний потенціал

Напруженість електричного поля — силова характеристика електростатичного поля, яка визначається відношенням сили  $F$ , що діє на додатній точковий заряд  $q$ , вміщений в дану точку поля до величини цього заряду.

Потенціал електричного поля — енергетична характеристика електричного поля; скалярна величина, що дорівнює відношенню потенціальної енергії заряду в полі, до величини цього заряду.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

## 1.2. Огляд електричного методу неруйнівного контролю

Електричний неруйнівний контроль — неруйнівний контроль, який ґрунтується на реєстрації параметрів електричного поля, що взаємодіє з об'єктом контролю або яке виникає в об'єкті контролю у результаті зовнішнього впливу.

Електричні методи контролю ґрунтуються на створенні в контрольованому об'єкті електричного поля або безпосереднім впливом на нього електричного поля (наприклад: електростатичне поле, поле постійного або змінного струму). Як первинні інформативні параметри використовують електричні характеристики об'єкта контролю, до яких належать:

- еопір -  $R$ ;
- струм  $I$ ;
- ємність  $C$ ;
- напруженість  $E$ ;
- відносна діелектрична проникність  $\epsilon$ .

Зазвичай для контролю конкретних об'єктів обирають декілька перерахованих параметрів, потім порівнюють з контрольованими параметрами об'єкта.

Застосовують тільки для контролю діелектричних і провідних матеріалів.

Існують такі типи електричного контролю:

- електростатичний
- порошковий
- термоелектричний
- електроіскровий
- електричного потенціалу.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За допомогою даного методу можна визначати дефекти різних матеріалів, вимірювати товщину стінок, покриттів і шарів, сортувати метали по марках, контролювати діелектричні або напівпровідникові матеріали.

Недоліками електричного НК є необхідність контакту з об'єктом контролю, жорсткі вимоги до чистоти поверхні виробу, труднощі автоматизації процесу вимірювання і залежність результатів вимірів від стану докільця.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

### 1.3. Огляд вихрострумowego методу неруйнівного контролю

Вихрострумний неруйнівний контроль — неруйнівний контроль, що ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, які наводяться в об'єкті контролю цим полем. Є одним з методів неруйнівного контролю виробів із струмопровідних матеріалів.

Вихрострумний метод контролю ґрунтується на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться котушкою збудження в електропровідному об'єкті контролю цим полем. Як джерело електромагнітного поля найчастіше використовується котушка індуктивності (одна або декілька), що носить назву «вихрострумowego перетворювача».

Синусоїдальний (або імпульсний) струм, що протікає в котушках вихрострумowego перетворювача, створює електромагнітне поле, яке збуджує вихрові струми в електромагнітному об'єкті. Електромагнітне поле вихрових струмів впливає на котушки перетворювача, наводячи в них ЕРС або змінюючи їх повний електричний опір. Реєструючи напругу на котушках або їх опір, отримують інформацію про властивості об'єкта і про стан перетворювача залежно від його розташування відносно об'єкта. Особливість вихрострумowego контролю полягає у тому, що його можна проводити без механічного контакту перетворювача з об'єктом. Їх взаємодія відбувається на відстанях, достатніх для вільного руху перетворювача відносно об'єкта (від часток міліметра до декількох міліметрів). Тому цими методами можна отримувати добрі результати контролю навіть за високих швидкостей відносного руху об'єктів.

Об'єктами вихрострумowego контролю можуть бути: основний метал, зварні з'єднання конструкцій, а також деталі. Вихрострумowym контролем можуть бути виявлені: кувальні, штампувальні, шліфувальні тріщини, надриви в елементах конструкцій та деталях; неметалеві включення, пори в поковках та

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

прокаті; тріщини, що виникли в елементах конструкцій та деталях при експлуатації машин.

Вихрострумовим методом не можуть бути проконтрольовані елементи конструкцій та деталі з різкими змінами магнітних або електричних властивостей; з дефектами (тріщинами), площини розкриття яких є паралельні до контрольованої поверхні або складають з нею кут менший від  $10^\circ$ . При вихрострумовому контролі не виявляються дефекти в елементах конструкцій та деталях: з поверхнями, на які нанесені електропровідні захисні покриття, якщо дефект не виходить на поверхню покриття; з поверхнями, покритими корозією.

Найкраще виявляються дефекти типу поперечних тріщин, зорієнтовані перпендикулярно до контрольованої поверхні. Ширина розкриття поперечної тріщини в певних межах не впливає на можливості її виявлення (20...30 мкм), однак можливості виявлення дуже щільних тріщин різко зменшується. Таке явище, наприклад, характерне для гартівних тріщин. Риски і надрізи в порівнянні з поперечними тріщинами, зазвичай, виявляються гірше. Заповнення порожнини дефекту брудом, нагаром, неелектропровідними оксидами тощо не призводить до зниження їх виявленості.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14



#### 1.4. Огляд принципу дії вихрових струмів у НК

Вихрострумний метод базується на використанні явища електромагнітної індукції. На контрольований виріб або його частину діють змінним магнітним полем (яке називають первинним), що створюється за допомогою струмів в обмотці збудження вихрострумного перетворювача (ВСП). В електропровідному об'єкті контролю (ОК) при цьому виникають вихрові струми, які формують вторинне електромагнітне поле. Характер і розподіл вихрових струмів залежить від геометричних параметрів (наприклад, товщини виробу), електрофізичних параметрів (питомої електричної провідності або магнітної проникності), а також від наявності дефектів (порушень суцільності) матеріалу та їх характеристик (типу дефекту, розмірів, глибини залягання). Зміни питомої електропровідності і магнітної проникності матеріалу пов'язані з його складом і структурою. Останні в свою чергу впливають на фізико-механічні характеристики матеріалу, зокрема твердість. Вторинне електромагнітне поле несе в собі, таким чином, інформацію про всі відмічені параметри ОК, які називають впливаючими параметрами (ВП). Тому вихрострумний метод є багатопараметровим. Це з одного боку визначає можливість широкого застосування методу, а з іншого – потребує спеціальних методик розділення інформації і підвищення селективності контролю необхідного параметра. При цьому параметри ОК, що впливають на вторинне електромагнітне поле, але не підлягають контролю, називають завадними параметрами (ЗП).

У вихрострумному контролі використовуються такі терміни і параметри:

**Сигнал вихрострумного перетворювача** – сигнал (напруга, або опір перетворювача), обумовлений взаємодією ВСП з ОК, який несе інформацію про ВП, що характеризують стан ОК.

**Внесена напруга або внесений імпеданс** вихрострумного перетворювача – приріст напруги або імпедансу на виході ВСП, спричинений внесеним в його електромагнітне поле ОК.

									Арк
									15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

**Годограф вихрострумowego перетворювача** (годограф внесеної напруги або імпедансу) – геометричне місце кінців вектора напруги на комплексній площині, отримане при зміні впливаючих параметрів ОК, режиму вихрострумowego контролю або утворених із них узагальнених змінних (робочої частоти, параметрів ВСП, робочого зазору, питомої електричної провідності, магнітної проникності, дефектів, тощо).

**Узагальнений параметр вихрострумowego контролю** – безрозмірна величина  $\beta$ , що характеризує властивості вихрострумowego перетворювача, об'єкта контролю або умови контролю:  $\beta = R\omega\sigma\mu\mu_c$ , де  $R$  – радіус еквівалентного витка обмотки перетворювача;  $\omega$  – кругова частота збуджуючого струму;  $\mu_c = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна постійна;  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріалу;  $\sigma$  – питома електропровідність матеріалу.

**Глибина проникання вихрових струмів** є дуже важливим для практики параметром вихрострумowego контролю, що традиційно визначається співвідношенням затухання плоскої електромагнітної хвилі в електропровідному просторі. Під глибиною проникання  $\delta$  вихрових струмів розуміють таку відстань від контрольованої поверхні, на якій величина вихрових струмів зменшується в  $e$  разів:

$$\delta = 0 \frac{1}{(3456)} \quad (1.1)$$

З наведеного співвідношення видно, що глибина проникання вихрових струмів залежить від електрофізичних параметрів матеріалу, а також від циклічної частоти  $\omega = 2\pi f$ , де  $f$  – робоча частота контролю. Глибина проникання зменшується зі збільшенням питомої електричної провідності, магнітної проникності або робочої частоти. Для феромагнітних матеріалів глибина проникання дуже мала навіть при низьких частотах. Хоча дане співвідношення широко застосовується в практиці і приведені в більшості довідників з вихрострумowego контролю, воно не відповідає реальному змісту і його некоректне використання може призвести до певних непорозумінь. Необхідно

									Арк
									16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

усвідомлювати, що ця величина є характеристикою матеріалу, а не параметром, що визначає режим контролю. Посилаючись на роботу «Механіка руйнування» під редакцією В.В. Панасюка, будемо вважати, що мінімальна товщина ОК, яка не впливає на точність вимірювання питомої електропровідності, відповідає величині  $2.8\delta$ , котру можна умовно вважати ефективною глибиною проникання вихрових струмів. Електромагнітні поля, що використовують у вихрострумовому контролі, в більшості випадків далекі від плоскої хвилі. Крім того, існує великий клас задач контролю тонкостінних ОК, при яких глибина проникання є більшою за товщину ОК, і розподіл вихрових струмів сильно залежить від товщини. Отже дійсна глибина проникання вихрових струмів є складною функцією багатьох параметрів. Зокрема, дуже сильно на глибину проникання вихрових струмів впливають такі параметри, як діаметр обмоток ВСП, товщина ОК, товщина проміжку між ВСП і ОК, відстань до краю ОК тощо. Тому останнім часом вводять поняття реальної глибини проникання вихрових струмів і досліджують її залежність від конкретних умов контролю.

Систему вихрострумового контролю можна умовно розглянути у вигляді двох взаємозв'язаних підсистем: підсистеми «вихровий перетворювач – об'єкт контролю» (ВСП – ОК), на виході якої формується сигнал ВСП, та підсистеми перетворення сигналів, в якій виділяється інформація про ВП [3][4].

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.5. Фізичні основи побудови вимірювачів електричного поля

Огляд фізичних методів побудови вимірювачів електричного поля був проведений в роботах Бірюкова С.В. Але основною метою дослідження автор ставив вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти. Нижче наведені ті фізичні явища які підходять для вимірювання постійного електричного поля.

Ємнісні ефекти. До ємнісних відносяться ефекти зміни діелектричної проникності деяких діелектриків (сегнетоелектриків, ферродіелектриків) під дією напруженості ЕП. Під дією зовнішнього електричного поля відбувається поляризація сегнетоелектрика за рахунок переорієнтації зарядів та цілих доменів. Що в свою чергу призводить до зміни їх діелектричної проникності.

Струмові ефекти. До струмових відносяться ефекти, засновані на виникненні або зміні електричного струму під дією напруженості ЕП.

Струмові ефекти засновані на явищах авто-і термоелектронної емісії. Явище автоелектронної емісії використовується в датчику, призначеному для вимірювання напруженості великих постійних і змінних ЕП промислової частоти. Датчик являє собою електровакуумний діод з одним, двома або трьома анодами. Внесення датчика в ЕП змінює розподіл потоку електронів між анодами. Головним недоліком датчиків такого типу є те, що аналогічний вплив на них буде вносити і магнітне поле, отже необхідно одночасно вимірювати магнітне поле і компенсувати його вплив на датчик.

Потенційні ефекти. До потенційних відносяться ефекти, засновані на явищах електричної та електромагнітної індукції, тобто виникненні електричних зарядів або зміну ЕРС під дією напруженості ЕП.

Явище електричної індукції полягає в поляризації провідного тіла в електричному полі - на його поверхні індукуються рівні по величині і протилежні за знаком заряди. При цьому поверхнева густина заряду на поверхні тіла буде пропорційною напруженості електричного поля.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Електромагнітні ефекти. До них можна віднести фізичні ефекти, пов'язані зі зміною магнітної проникності в деяких ферроелектриках (ферити, магнітодіелектрики) під дією ЕП. Очікувані показники датчиків, побудованих на електромагнітному ефекті: нелінійність характеристики, гістерезис, вплив магнітних полів.

Електромеханічні ефекти. Електромеханічними ефектами називаються сукупності явищ, що виникають в дисперсійних системах і виражаються або в русі однієї фази відносно іншої, або в зміні інших механічних властивостей матеріалів під дією напруженості ЕП.

На електроди, в непровідному середовищі буде діяти сила:

$$F_z = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_{\perp} E^2 \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_0$  - діелектрична постійна,  $\varepsilon_{\perp}$  - діелектрична проникність середовища, в якій знаходиться датчик.

Подібні датчики характеризуються складністю конструкції, впливом різних факторів, що впливають (температура, частота поля) на їх характеристики, спотворенням поля. Їх перевага полягає в тому, що вони реагують на діюче значення напруженості ЕП, незалежно від орієнтації датчика в просторі.

Електротеплові ефекти. Електротепловими ефектами називаються ефекти, в яких під дією ЕП відбувається зміна температури діелектрика (електрокалоричний ефект) або теплопровідності газів. Чутливим елементом датчиків, побудованих з використанням електрокалоричного ефекту, служать піроелектрики, зміна температури в яких пропорційна напруженості ЕП. Однак такі датчики мають дуже низьку чутливість.

Електрооптичні ефекти. Електрооптичними ефектами називаються ефекти, пов'язані зі змінами інтенсивності оптичного випромінювання, коефіцієнта заломлення, кольору електрооптичних матеріалів, а також виникненням оптичного випромінювання в газах під дією напруженості ЕП.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електропросторові ефекти. Електропросторовими ефектами називаються ефекти, пов'язані зі зміною просторового положення (переміщення) матеріальних об'єктів або зміна їх геометричних розмірів під дією напруженості ЕП. Тут можна виділити три фізичні ефекти, придатних для побудови датчиків напруженості ЕП. Перший фізичний ефект пов'язаний з відхиленням електронного променя і заряджених частинок під дією ЕП. Недоліком датчиків з використанням цього ефекту є низька точність і складність конструкції. Другим фізичним ефектом є зворотний п'єзоелектричний ефект, що полягає в деформації п'єзоелектриків під дією ЕП. Лінійність характеристики датчика спостерігається до 250 кВ/м. Похибка таких датчиків обумовлена впливом температури і часовою нестабільністю фізичних властивостей п'єзоелектриків. Третім фізичним ефектом є електрострикція - деформація діелектриків (твердих, рідких і газоподібних) під дією ЕП.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.6. Огляд існуючих методів вимірювання постійного ЕП

Електричне поле в атмосфері є результатом взаємодії електричних зарядів в ній та на поверхні землі. Середня напруженість поля в атмосфері у поверхні землі 120-150 В/м.

Перші методи вимірювання напруженості електричного поля заключались у розміщенні в просторі ізолюваного колектора, який віддавав або приймав заряд доти, доки його потенціал не вирівнювався з потенціалом, який мала та точка простору до розміщення в неї колектора. Після чого до колектора під'єднувався електроскоп та вимірювався потенціал. Далі за формулою

$$E = \frac{V}{h} \quad (1.3)$$

Де  $E$ - напруженість електричного поля,  $V$ - потенціал колектора,  $h$ - висота над землею (потенціал землі приймається за нуль), розраховувалась напруженість електричного поля.

Заряд колектора змінюється за рахунок іонних струмів, тобто через його контакт з зарядженими частками в навколишньому об'ємі повітря.

Час встановлення потенціалу колектора буде залежати від власної ємності колектора та провідності навколишнього повітря. Тобто залежність потенціалу колектора від часу буде мати наступний вигляд

$$Vk(t) - V = (Vk_{\zeta} - V)e^{-\frac{t}{Rk \cdot Ck}} \quad (1.4)$$

$Vk(t)$  потенціал колектора в момент часу  $t$ ,  $V$  – потенціал точки простоу  
 $Vk_{\zeta}$  – потенціал колектора в початковий момент часу,  $Rk$  – провідність навколишнього середовища,  $Ck$  – ємність колектора.

Всі вимірювачі на базі колекторів являються надзвичайно інертними системами адже час виміру буде складати  $4.61 * Rk * Ck$ . Також провідність середовища це величина, яка буде залежати від вологості, температури, швидкості повітря, рівня іонізації.

Для підвищення провідності повітря в колектори спеціально вводять радіоактивні речовини, це дозволяє зменшити час встановлення потенціалу

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

колектора з 450с до 9с. Також колектори вносять значні спотворення в вимірюване поле, що в свою чергу призводить до похибок вимірювання напруженості, особливо це стосується колекторів з іонізацією навколишнього середовища, наприклад радієво-торієвих колекторів.

Динамічні методи вимірювання електричного поля базуються на явищі електростатичної індукції, і полягають у модуляції постійного електричного поля. Модуляція здійснюється за допомогою екранування сенсора вимірювача від зовнішнього поля, лінійного переміщення вимірювача в полі, або його обертання.

Виходячи з теореми Гауса для електричної індукції

$$\Phi_Q \approx \oint_X EdS = \frac{V}{W_6} \quad (1.5)$$

Потік вектора напруженості електричного поля через замкнуту поверхню пропорційно відноситься до заключеного в цій поверхні заряду.

Якщо розглядати єдиний точковий заряд в замкнутій поверхні S, при чому в разі коли S це сфера з центром у заряді то

$$\Phi_{Q,X} = \oint_X EdS = E \oint_X dS = ES \quad (1.6)$$

Таким чином

$$ES = \frac{V}{W_6} \quad (1.7)$$

При динамічній модуляції відбувається зміна заряду Q на сенсорній пластині, а це в свою чергу призводить до протікання струму.

$$i = \frac{IV}{I\Lambda} \quad (1.8)$$

Існують також методи на основі коронарного розряду[3]. Вимірюється момент появи коронарного розряду, причому може вимірюватись відстань, при якій з'являється розряд між двома електродами, або електродом та падаючою зарядженою частинкою, або величина додаткового поля, яке подається на електроди з фіксованою відстанню до моменту появи коронарного розряду. В деяких методах вимірюється струм що протікає через коронарний розряд.

										Арк
										22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



Також відомі методи в основі яких лежить відхилення електронного пучка під дією електричного поля. Ці методи дозволяють вимірювати поля менші за 1В/м, але мають надзвичайно складну конструкцію. В основному вони використовуються в аерокосмічній галузі, так як вимірювач не піддається прямому впливу навколишнього середовища в той час як традиційні методи, наприклад на основі явища електричної індукції не підходять для умов космосу, так як їх металеві сенсорні електроди взаємодіють з космічною плазмою та високоенергетичними частками.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 1.7. Огляд існуючих засобів вимірювання постійного ЕП

### 1.7.1. Прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу з екраном що обертається

Перший вимірювач електричного поля з обертаючимся екраном з'явилися в 1933 році, і його конструкція виявилась настільки вдалою що вона використовуються і в нинішній час, крім того цей тип вимірювачів електростатичного поля являється найбільш розповсюдженим в порівнянні з іншими типами вимірювачів. Типова конструкція вимірювача зображена на рис 1.1.

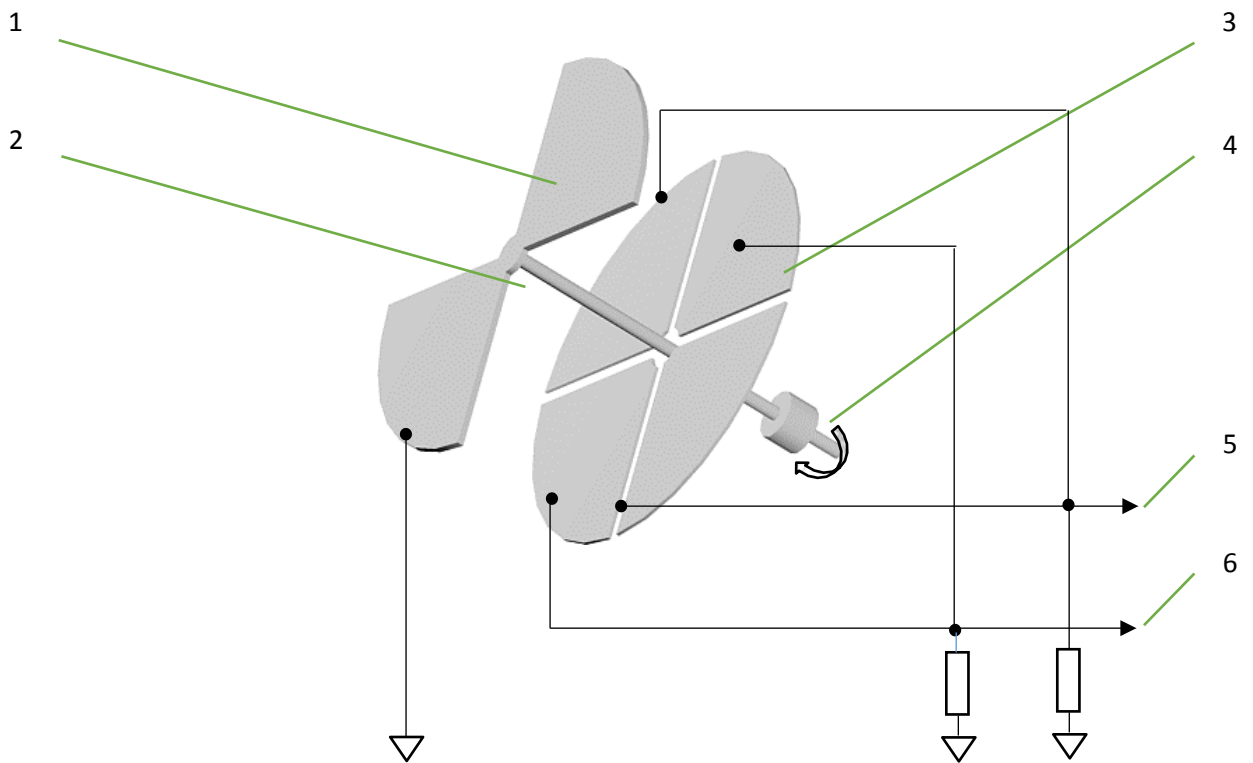


Рис 1.1 - Типова конструкція вимірювача електричного поля з обертаючимся екраном

Екран 1 обертається над сенсорними пластинами 3, протилежні пластини між собою з'єднані. Вал 2 обертає екран та повинен бути заземлений на корпус вимірювача. При обертанні заземленого екрана над сенсорною пластиною

відбуваються цикли зміни кількості заряду на сенсорних пластинах. Під час циклу закриття пластини з неї зтікає індукований заряд через опір  $R$ , що викликає струм, під час циклу відкривання пластини на ній накопичується заряд, при цьому струм протікає у іншому напрямку. Також напрям струму буде залежати від напрямку вектора електричного поля в якому експонуються пластини. Для визначення знаку поля використовується датчик положення 4, який дозволяє співставити напрям струму з положенням екрану. На виходах 5 та 6 будуть спостерігатись коливання напруги на частоті обертання екрану помноженій на кількість пар сенсорних електродів, та пропорційні напруженості електричного поля.

На рис 1.2 зображена схема сенсора сучасного електрометра [12] принципово вона відрізняється формою сенсорних пластин та методом детектування положення екрану. В цій конструкції на модуляторі встановлюються постійні магніти, які при обертанні наводять ЕДС у котушках, встановлених на сенсорних елементах. Також цей вимірювач відрізняється тим що його електронна схема проводить компенсацію паразитних струмів, обумовлених забрудненнями ізоляційного покриття вимірювальних пластин, та струмами втрат підсилювача.

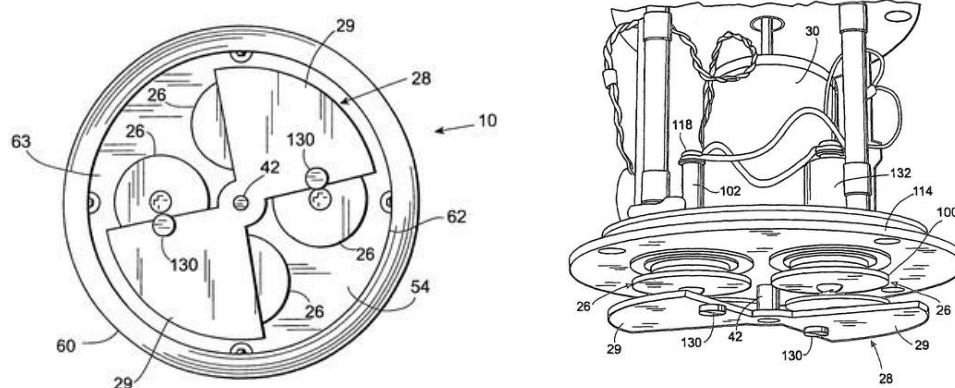


Рис 1.2.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

На рис 1.3. зображена а схема всепогодного електрометра [13]. Особливістю його конструкції є наявність додаткового електрода в ланцюгу зворотного зв'язку. Цей електрод знаходиться між сенсорними пластинами та корпусом приладу, таким чином струм втрат обумовлений погіршенням ізоляційних властивостей, потрапляє на цей додатковий електрод і компенсує зменшення рівнів сигналу з основного електрода за рахунок позитивного зворотного зв'язку.

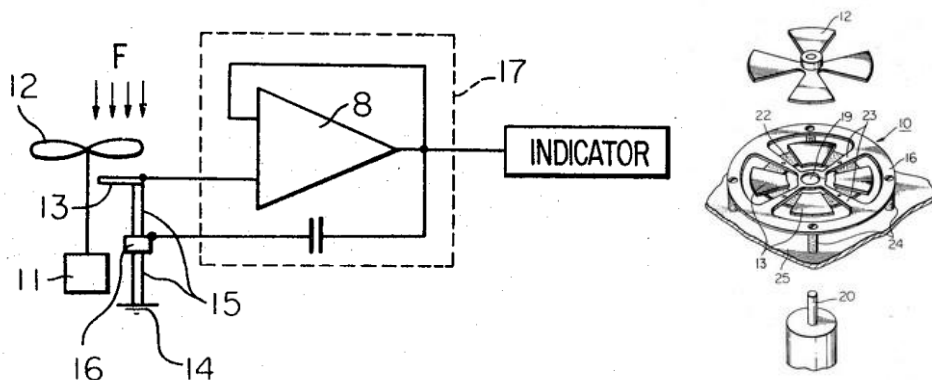


Рис 1.3. - Схема всепогодного електрометра

Більшість електрометрів вимагають регулярної калібровки, з застосуванням спеціального обладнання, але існують схеми, які дозволяють автоматично калібрувати прилад. На рис 1.4. Зображена схема автокалібровки системи для моніторингу низькочастотного електричного поля [14], система представляє ряд електрометрів з'єднаних у мережу, самі електрометри побудовані по класичній схемі але їх особливістю являється саме схема автокалібрування. Для калібрування на екрануючий електрод подається відома напруга, при цьому вимірюється величина зміни вихідного сигналу, проводиться ряд вимірів з різними заданими напругами, та визначаються калібровочні коефіцієнти. Також в винаході [14] приводяться інші можливі схеми автокалібрування, де додаткова напруга подається на встановлений над екрануючим електродом додатковий електрод, або на стаціонарний секторний екран.

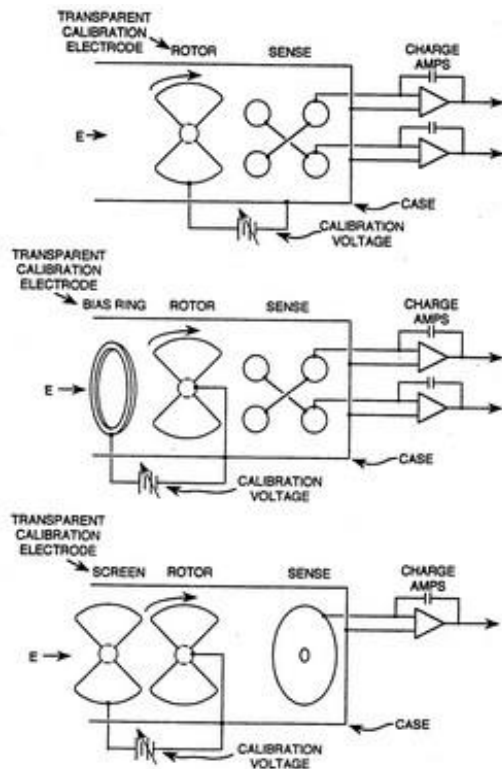


Рис 1.4.- Схема автокалібровки системи

На рис. 1.5 Зображена схема електрометра [15] особливістю якої є відсутність датчика положення екрануючого електрода. Знак поля визначається по сигналу з сенсорного електрода, для цього форма сенсорного електрода та екрануючого вибрані так щоб зберігалась умова

$$\frac{\Delta\hat{\lambda}}{\Delta\lambda} \geq 1 \quad (1.9)$$

Де  $\Delta t$ ; період експонування сенсорного електрода,  $\Delta t_1$  період екранування сенсорного електрода, таким чином завдяки асиметрії півхвиль вихідного сигналу, проаналізувавши його стає можливо визначити якому з положень екрануючого електрода відповідає данна півхвиля сигналу. Аналогічний метод визначення знаку поля використовується в приладі [16], зображеному на рис 1.6, за виключенням того що співвідношення  $\frac{\Delta\hat{\lambda}}{\Delta\lambda}$  обирається більшим, або

рівним 3. Аналіз знаку проводиться по різниці амплітуд двох півхвиль сигналу.

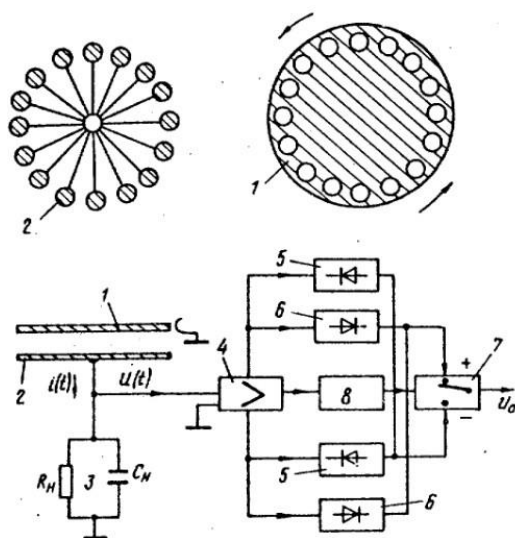


Рис 1.5. - Схема електрометра

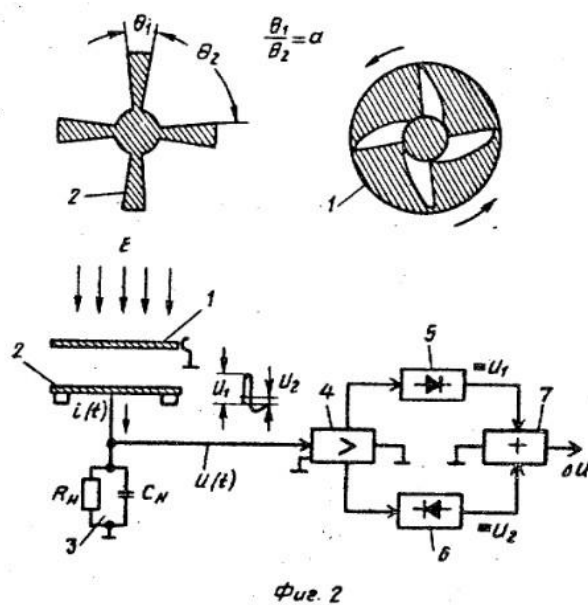


Рис 1.6. -

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 1.7.2. Прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу з вібруючим електродом

Аналогічно приладам з обертаючимся екрануючим електродом, прилади з вібраційним електродом модулюють напруженість поля біля сенсорного електроду та основані на методі електростатичної індукції. Переваги такого методу в порівнянні з методом де модуляція відбувається за рахунок обертання екрануючого електрода полягають у спрощеній конструкції вимірювача та можливості мінімізувати його розміри, відсутності електромотора. Також однією з основних переваг є відсутність тертьових контактів, адже при модуляції за рахунок обертання однією з головних проблем є забезпечення надійного електричного контакту між корпусом вимірювача та екрануючим електродом, періодичний розрив цього контакту призводить до значного зростання рівня шумів. Недоліками такого методу є незначний коефіцієнт модуляції, невеликі розміри вібруючого електрода (зазвичай декілька квадратних сантиметрів), труднощі при екрануванні сенсорного електрода від сигналів збудження вібруючого електрода.

Коефіцієнт модуляції  $K_b$  це відношення напруженості постійного  $E_0$  поля до діючої величини напруженості змінного електричного поля  $E_{\sim}$  спричиненого модуляцією.

$$K_b = \frac{Q_{\sim}}{Q_0} \quad (1.10)$$

При модуляції електродом що обертається, напруженість змінного поля буде змінюватись від нуля до  $E_0$ , і буде складати 50%. Для вібруючих електродів ця величина зазвичай значно менша. На рис. 1.7 зображені спрощені варіанти реалізації вібраційного вимірювача.

На рис 1.7.а зображений самий простий варіант вібраційного електрометра, де над фіксованим сенсорним електродом 1 переміщується модулюючий електрод 2 на який подається вимірюваний потенціал. Амплітуда коливань вимірюючого електрода складає  $\frac{\Delta l}{l}$ , при цьому поле у вимірюючого електрода буде змінюватись за законом:

						ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			29

$$E = \frac{?}{[g_{ijk}^{\Delta h}]} \quad (1.11)$$

Таким чином коефіцієнт модуляції для такого варіанта буде:

$$K_b = \frac{h m \Delta h}{h} = \frac{?}{[g_{ijk}^{\Delta h}]} \quad (1.12)$$

Для максимального коефіцієнта модуляції необхідно щоб  $\frac{\Delta l}{1} \cong d$

У такого методу вимірювання є недолік, який полягає в тому, що він дозволяє вимірювати лише потенціали. При вимірюванні зарядів коливання електроду 2 буде змінювати ємність електроду 1:

$$C = C_0 + \frac{X}{uv([g_{ijk}^{\Delta h}])} \quad (1.13)$$

Це в свою чергу призведе до зменшення коефіцієнта перетворення  $K_b$ , адже при збільшенні поля коло сенсорного електроду 1 одночасно буде збільшуватись і його ємність.

На рис 1.7.в Зображена схема вібраційного електрометра в якій відсутній вказаний вище недолік. Це досягається за рахунок введення додаткового електроду 3. В цій схемі вібрує заземлений електрод 3. При його коливаннях змінюється поле навколо електроду 2, на який подається вимірювана напруга або заряд, це в свою чергу змінює величину заряду індукованого на сенсорному електроді 1. Напруженість поля  $E$  у сенсорного електроду 1 буде:

$$E = \frac{Q}{S} = \frac{V}{[g_{ijk}^{\Delta h}]} \quad (1.14)$$

Де  $V_1$  – потенціал електроду 2,  $Q$  - заряд на електроді 2,  $d_{,1}$  – відстань між першим та другим електродами,  $C_{(1)}$  – ємність електроду 2 при середньому положенні електроду 3,  $C_{1z}$  – величина зміни ємності електроду 2 спричинена коливаннями електроду 3.

Ємність електроду 1 можна знайти за наступною формулою:

$$C = C_0 + \frac{X}{uv([g_{ijk}^{\Delta h}])} \quad (1.15)$$

Де  $C_0$  – та частина ємності електроду 1, що не залежить від присутності електроду 3,  $S$  – площа електроду 1,  $d_{,z}$  – середня відстань між електродами 1 і

						Арк
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



$3, \frac{\Delta d}{1}$  – амплітуда коливань модулюючої пластини 3. При цьому наближення пластини 3 до пластини 1 призводить до збільшення ємності і одночасного зменшення поля, таким чином коефіцієнт модуляції збільшується.

На рис 1.7.в зображений варіант електрометра, особливістю якого є те що модуляція поля навколо сенсорної пластини відбувається за рахунок її власного переміщення. Електрод 3 представляє з себе заземлену на корпус вимірювача пластину з отвором, розрахунок проводиться аналогічно 1.7.а

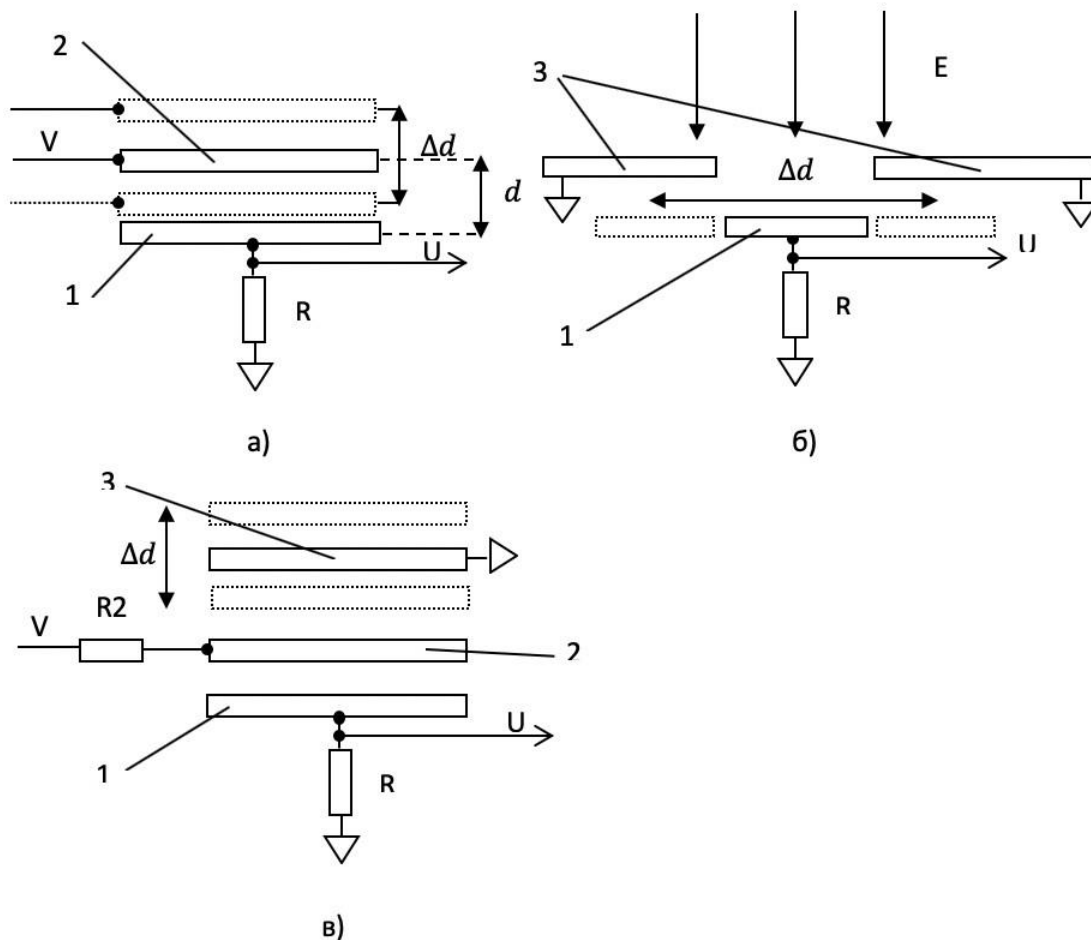


Рис 1.7. Спрощені варіанти реалізації вібраційного методу

Значною перевагою вібраційних електрометрів є широкий частотний діапазон, на рис 1.8. зображений електрометр [17] з полоєю пропускання, як стверджує автор, в районі 500Гц – 1000Гц, це досягається завдяки частоті модуляції в 1000Гц – 2000Гц.

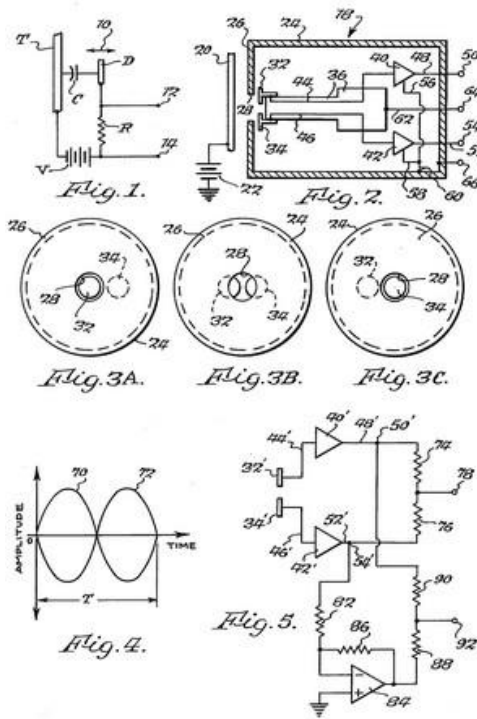


Рис 1.8. - Електрометр

Особливістю сенсора електрометра [18], зображеного на рис 1.9.а є можливість його виготовлення за дешевим технологічним процесом. Вся конструкція розміщується на закріпленому з однієї сторони віброуючому елементі, а саме сенсорний електрод, підсилювач та елемент що збуджує коливання, наприклад п'єзоелектричний резонатор.

Електрометр [19], конструкція якого зображена на рис 1.9.в, складається з механічного резонатора 2, на який закріплені екрануючі електроди 2а, 2б, під екрануючими електродами розміщений сенсорний електрод 3, резонатор збуджується двома п'єзокерамічними резонаторами на своїй резонансній частоті. На рис 1.9г. зображена схема цього електрометра, його особливістю являється метод компенсації наведеного на сенсорний електрод сигналу збудження від п'єзокерамічних резонаторів. Суть методу полягає в подачі сигналу збудження та сигналу з сенсорного електроду на диференційний підсилювач 17.

					Арк
					32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

При чому сигнал з сенсорного електроду або з генератору мають бути інвертовані. На рис 1.9.б зображений варіант електрометра [19] з іншою формою механічного резонатора.

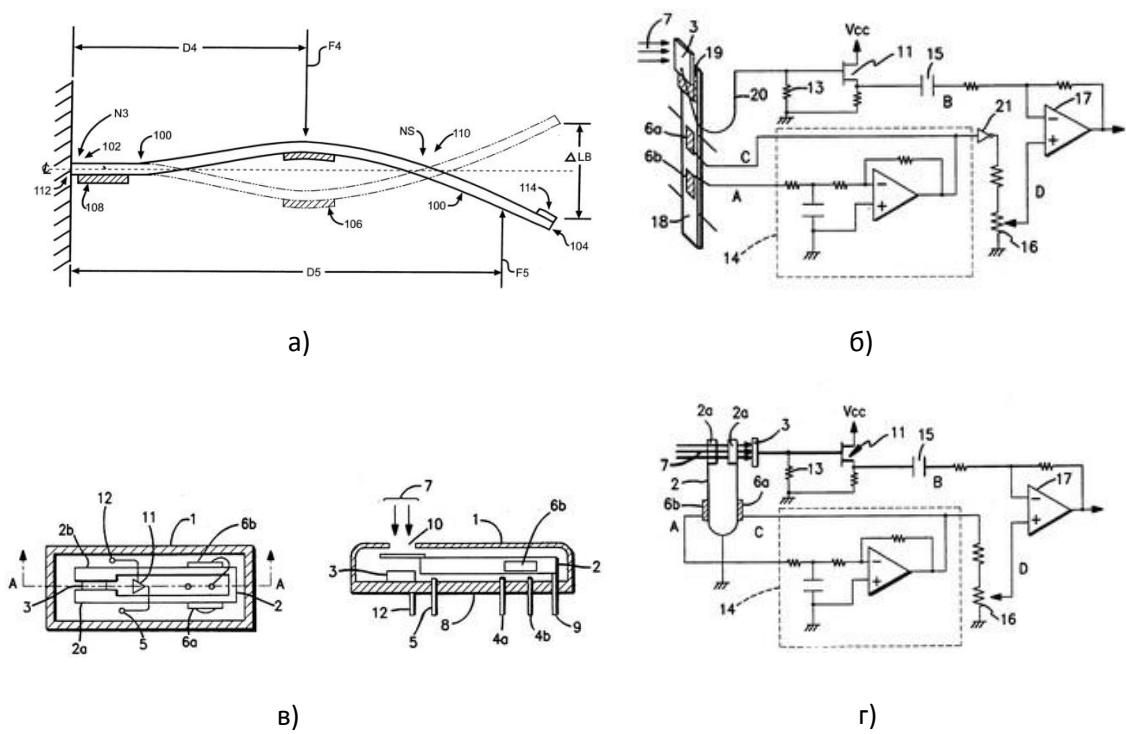


Рис 1.9. - Схема цього електрометра

### 1.7.3. Інші прилади для вимірювання напруженості електричного поля на основі динамічного методу

На рис 1.10 зображений прилад для вимірювання горизонтальної та вертикальної складових електричного поля в атмосфері [20]. Прилад представляє з себе повітряну кулю високого тиску, поверхня кулі розділена на чотири квадранти на які нанесені ізольовані електроди. Всередині кулі знаходиться електроніка для обробки сигналів які наводяться на сенсорні електроди. Також на поверхню кулі встановлено спеціальні засоби, що дозволяють кулі обертатись. Підчас обертання кулі, заряд на електродах буде змінюватись, перетікаючи з одного електрода, на інший. Одна група електродів дозволяє вимірювати горизонтальну складову поля, а інша – вертикальну. Прилад дозволяє проводити вимірювання всередині грозових хмар та підчас поганої погоди.

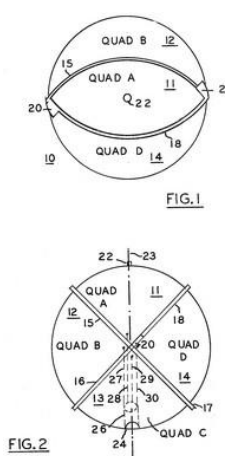


Рис 1.10. - Прилад для вимірювання горизонтальної та вертикальної складових електричного поля в атмосфері

На рис. 1.11 зображено прилад для вимірювання напруженості двох складових вектору електричного поля[21]. Особливістю цього приладу є те що на відміну від електрометрів з обертаючимся екрануючим електродом в ньому обертаються сенсорні електроди. Також цей вимірювач дозволяє реєструвати іонні струми.

										Арк
										34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

В роботі [22] автори вимірювача показують зв'язок між іонним струмом і індукованим струмом для вимірювача [21]:

$$i(t) = 4re_c(E_c \omega \sin \omega t + E_A \omega \cos \omega t) \quad (1.16)$$

В той час струм спричинений контактом сенсора з зарядженими частками:

$$i(t) = \frac{z}{1} A (I_c \cos \omega t + I_A \sin \omega t) \quad (1.17)$$

Таким чином амплітуда іонного струму не залежить від частоти обертання сенсора, а амплітуда індукованого струму залежить. Тобто проводячи виміри на різних частотах з'являється можливість розділяти ці складові.

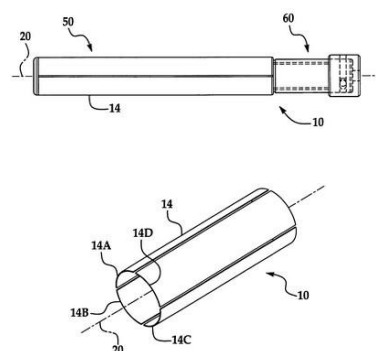


Рис 1.11. - Прилад для вимірювання напруженості двох складових вектору електричного поля

В роботі [23] описується вимірювач електричного поля на базі п'єзокерамічного резонатора, на поверхню якого нанесені електроди. Як видно з рис 1.12. На електроди 3 подається сигнал збудження, при цьому сам резонатор змінює свою довжину, тобто змінюється площа сенсорних електродів 5 і 2

Струм що буде протікати через вхідний опір підсилювача буде:

$$i(t) = \frac{\Delta V}{\Delta l} = e_c \Delta S E \omega \cos \omega t \quad (1.18)$$

Для стабілізації амплітуди поздовжніх коливань резонатора на нього додатково нанесений електрод зворотнього зв'язку 4. Напряга на електроді 4 буде пропорційною амплітуді поздовжніх коливань, так як використовується зворотній поздовжній пьезоелектричний ефект. Електрод 6 використовується для

зворотнього зв'язку по електричному полю. Як запевняють автори, після фільтрації сигналу та подавлення напруги наведеної сигналом збудження, вдалось досягнути чутливості в 0.2 В/м при точності в 1%

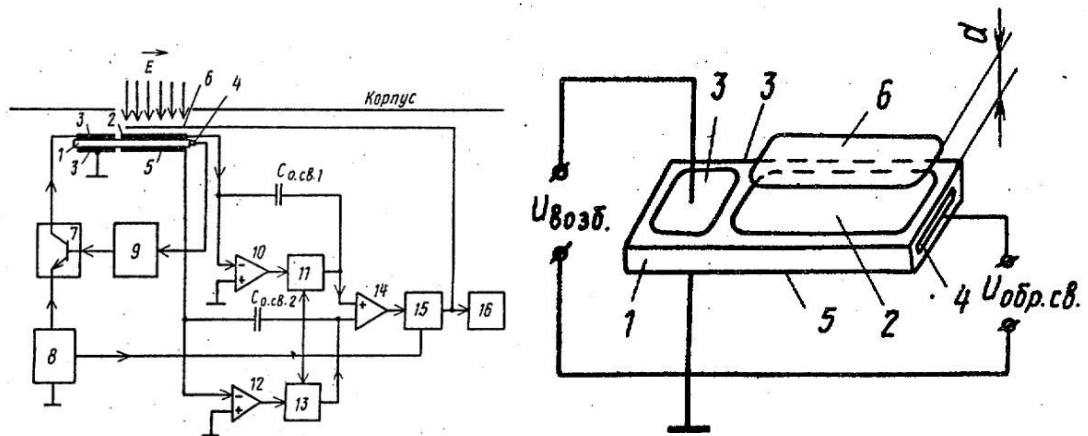


Рис 1.12. Вимірювач електричного поля

### 1.8. Модель електростатичного флюксометра

На даний момент точна модель електростатичного флюксометра ротаційного типу відсутня. Перший аналіз математичної моделі для такого типу вимірювачів були зроблені Імянітовим [1]. Більш детальна модель була розроблена В. С. Аксельродом, В. А. Мондрусовим, К. Б. Щигловским [29]. Спроби застосувати вказані моделі до експериментального зразка показали значну розбіжність між експериментальними даними та теоретичними.

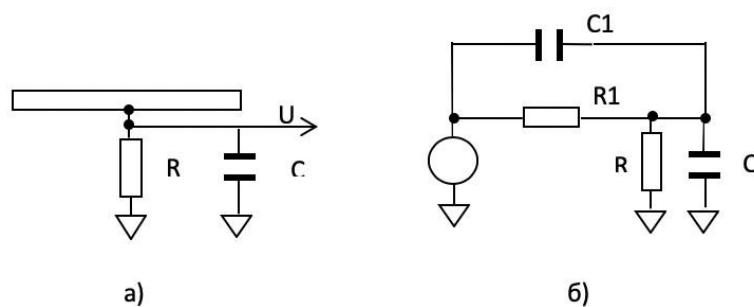


Рис 1.13

Якщо розглядати модель рис 1.13.a то виходячи з рівняння збереження заряду

$$\text{div } \vec{U} \vec{a} + \frac{\vec{a} \vec{a}}{\vec{a}} = 0 \quad (1.19)$$

Де  $\vec{j}$  – вектор густини струму обумовлений провідністю середовища в якому знаходиться сенсор

$\vec{D}$  - вектор електростатичної індукції

Інтегрування (1) по об'єму сенсора з використанням теореми Остроградського – Гауса дає

$$\int_{\epsilon} \operatorname{div} \vec{D} + \frac{\vec{a}}{\Delta} dV = \oint_{X} \vec{D} + \frac{\vec{a}}{\Delta} dS = 0 \quad (1.20)$$

Поверхня інтегрування може бути розбита на два діапазони

$$S = S_2 + S_1 \quad (1.21)$$

$S_2$ - поверхня сенсора

$S_1$ - переріз з'єднувального провідника

Тоді:

$$\int_{X_2} \vec{D} + \frac{\vec{a}}{\Delta} dS = \int_{X_1} \vec{j} dS = i = \frac{\epsilon}{L} + \frac{1}{L} uC \quad (1.22)$$

При інтегруванні по площі сенсора  $S_2$ ; скористаємось принципом суперпозиції і розглянемо три випадки: сенсор ідеально ізолюваний і розміщений у вимірюване поле, також введем поняття опорної точки потенціал якої рівний потенціалу ізолюваного зонда, розміщеного поряд з цією точкою; сенсор з потенціалом  $u$  і зарядом  $q$  знаходиться також поряд з опорною точкою але вимірюване поле відсутнє; сенсор ізолюваний і має заряд  $Q$  і потенціал  $\phi$  протилежний до потенціалу опорної точки.

Таким чином потенціал зонду буде рівний:

$$\phi = \phi_{от} + u - \phi_{от} = u \quad (1.23)$$

Проведемо інтегрування:

$$\begin{aligned} \int_{X_2} \vec{D} + \frac{\vec{a}}{\Delta} dS &= \int_{X_2} (\gamma E_k + \epsilon \frac{\partial Q^p}{\partial t}) dS = \\ & \int_{X_2} (\gamma E1_k + \epsilon \frac{\partial E1_k}{\partial t}) dS + \int_{X_2} (\gamma E2_k + \epsilon \frac{\partial E2_k}{\partial t}) dS \\ & + \int_{X_2} (\gamma E3_k + \epsilon \frac{\partial E3_k}{\partial t}) dS \end{aligned} \quad (1.24)$$

Де  $E1_k$  – нормальна складова електричного поля на поверхні сенсора для першого випадку,  $E2_k$  – нормальна складова електричного поля на поверхні сенсора для другого випадку,  $E3_k$  – нормальна складова електричного поля на поверхні сенсора для третього випадку

Так як:

$$\int_{X^{\wedge}} E1_k dS = 0 \quad (1.25)$$

$$\int_{X^{\wedge}} \gamma E2_k dS = \frac{\hat{e}}{\ddot{e}_{розт}} \quad (1.26)$$

$$\int_{X^{\wedge}} E3_k dS = -\frac{\hat{u}^{от}}{\ddot{e}_{розт}} \quad (1.27)$$

$$\int_{X^{\wedge}} \varepsilon \frac{\ddot{a}Q1^p}{\ddot{a} \setminus} = \frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} \int_{X^{\wedge}} \varepsilon E2_k dS = \frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} u C_{\zeta} \quad (1.28)$$

$$\int_{X^{\wedge}} \varepsilon \frac{\ddot{a}Qz^p}{\ddot{a} \setminus} = \frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} \int_{X^{\wedge}} \varepsilon E3_k dS = -\frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} \varphi_{от} C_{\zeta} \quad (1.29)$$

Рівняння яке буде пов'язувати потенціал опорної точки і напругу на вході вимірювального ланцюга матиме наступний вигляд

$$u \frac{\ddot{z}}{\ddot{e}} + \frac{\ddot{z}}{\ddot{e}_{розт}} \hat{u} + \frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} u (C + C_{\zeta}) = \frac{\hat{u}^{от}}{\ddot{e}_{розт}} + \frac{\ddot{a}}{\ddot{a} \setminus} \varphi_{от} C_{\zeta} \quad (1.30)$$

Для аналізу динамічного флюксометра розглянемо випадок аналогічний попередньому, за винятком того, що потенціал опорної точки рівний нулю, так як вимірюється потенціал на заземленій, провідній поверхні. В такому випадку проведемо інтегрування по трьом площам:

$$S = S_{\zeta} + S_1 + S_z \quad (1.31)$$

$S_{\zeta}$  - поверхня сенсора експонована у вимірюваному полі

$S_1$  - переріз з'єднувального провідника

$S_z$  - поверхня сенсора екранована від вимірюваного поля

Напруженість поля  $E$  на поверхні сенсора  $S_{\zeta}$  буде рівною:

$$E = \frac{\ddot{z}}{\ddot{e}} \int_{X^{\wedge}} \vec{E} d\vec{S} \quad (1.32)$$

Розглянемо два випадки:  $\vec{E} = 0$ , тобто сенсор екранований і  $\vec{E} \neq 0$ , сенсор експонований у полі.

									Арк
									38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



Для випадку  $\vec{E} = 0$

$$\varphi = u$$

Тобто потенціал зонда буде рівний напрузі на вході вимірювача, при цьому сам сенсор буде створювати поле  $E_2$

Для випадку  $\vec{E} = 0$

$$\varphi = 0, E_1 = \vec{E}$$

За принципом суперпозиції сума першого і другого випадків дає:

$$\varphi = u, E = \vec{E}$$

Так як:

$$\vec{D} = \vec{E}$$

$$\oint_{X_{\wedge}} \vec{D} \cdot d\vec{S} = -ES;$$

$$\oint_{X_{\wedge}} \vec{D} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_{X_{\wedge} X_{\wedge}} \gamma \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{u}{R_{\text{розт}}}$$

$$\int_{X_{\wedge} X_{\wedge}} \epsilon \frac{\ddot{a}}{a} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\ddot{a}}{a} \int_{X_{\wedge} X_{\wedge}} \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\Gamma}{\Gamma} u C_C \quad (1.33)$$

Рівняння що пов'язує напруженість поля з сигналом на вході вимірювача:

$$u \ddot{e} + \frac{\dot{z}}{\ddot{e}_{\text{розт}}} \dot{u} + \frac{\ddot{a}}{a} u (C + C_C) = \gamma E_C S; + \epsilon \frac{\Gamma}{\Gamma} E_C S; \quad (1.34)$$

В разі вимірювання поля в непровідному середовищі  $\gamma=0$ ,  $R_{\text{розт}} \rightarrow \infty$  тоді

$$u \ddot{e} + \frac{\ddot{a}}{a} u (C + C_C) = \epsilon \frac{\Gamma}{\Gamma} E_C S; \quad (1.35)$$

При умові що  $E_C$  постійна величина і змінюється тільки за рахунок екранування то після диференціювання маємо:

$$u = e^{-\int_{G_6}^G \Phi(\lambda) \Gamma} \int_{C \setminus C} f_1(t) e^{\int_{G_6}^G \Phi(\lambda) \Gamma} dt \xi \quad (1.36)$$

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$f(t) = \frac{1}{C(t)} \cdot \frac{1}{R} + \frac{dC(t)}{dt} \parallel$$

$$f1(t) = \frac{wQ \cdot IX}{w(\lambda) \cdot \lambda} \quad (1.37)$$

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

## 1.9. Моделювання зміни ємності сенсора динамічного флюксометра за допомогою методу кінцевих елементів

На даний момент існує дві моделі які описують зміну ємності електростатичного флюксометра ротаційного типу:

$$1) C(t) = C_c + C_b(1 - \frac{1}{\beta})$$

$$2) C(t) = C_c + C_b \sin \omega t$$

На рис 1.15.а зображений графік для першого випадку, а на рис 1.15.б зображений графік для другого випадку. Графіки наведені для ілюстрації відмінностей у характері зміни ємності в залежності від моделі.

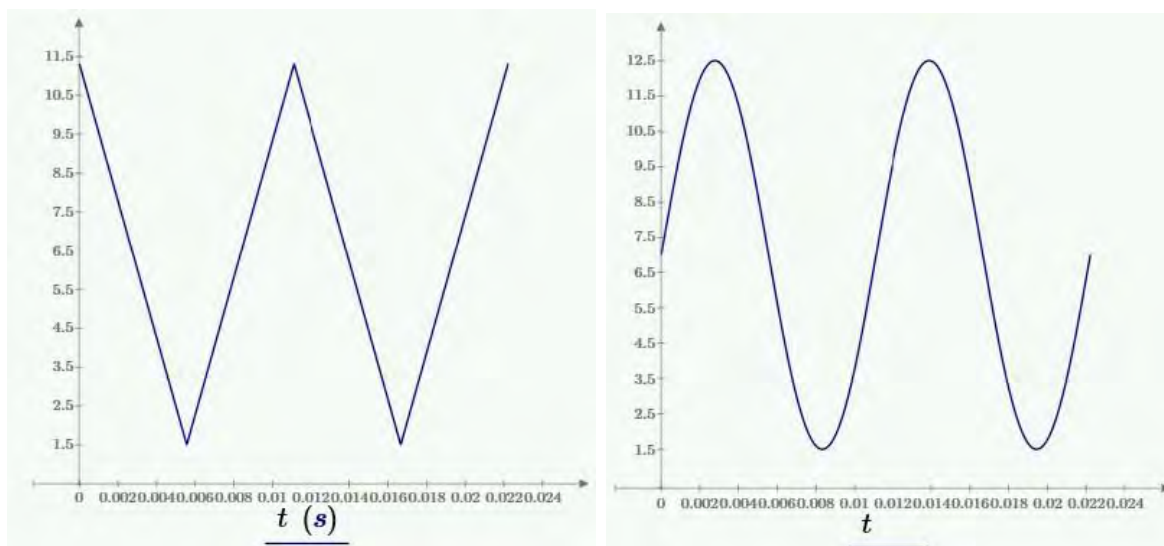


рис 1.15

Для встановлення точного закону зміни ємності секторного плаского конденсатора при обертанні було проведено моделювання за методом кінцевих елементів.

На рис 1.16 зображена модель сенсора: 2 пласкі секторні електроди у повітряному просторі при відсутності об'ємного заряду

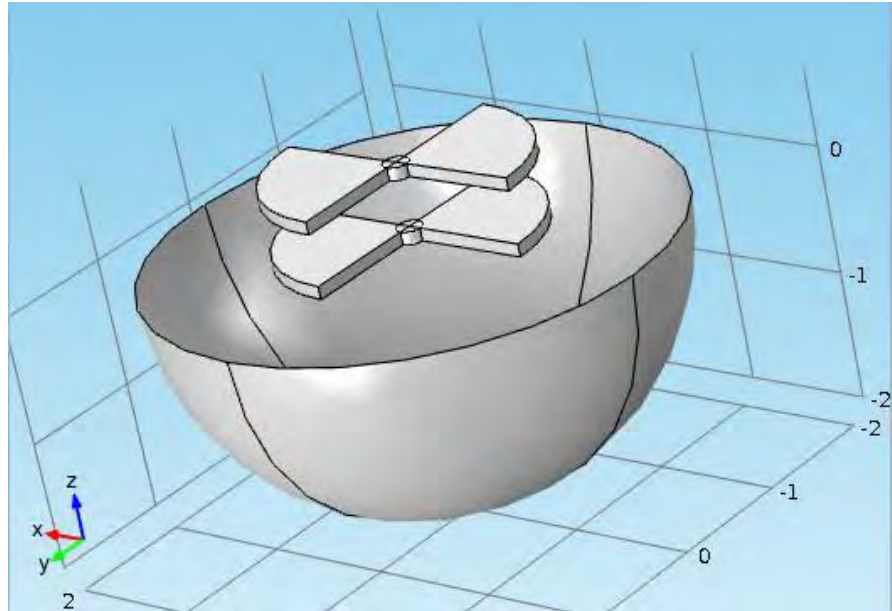


Рис 1.16

На рис 1.17 зображене поле створюване електродами при подачі на верхній потенціалу в 1 вольт і заземленні другого. Верхній електрод обертався над нижнім навколо своєї осі і вимірювалась ємність системи з двох електродів. При цьому передбачається що нижній електрод представляє з себе сенсор, а верхній – електричний екран.

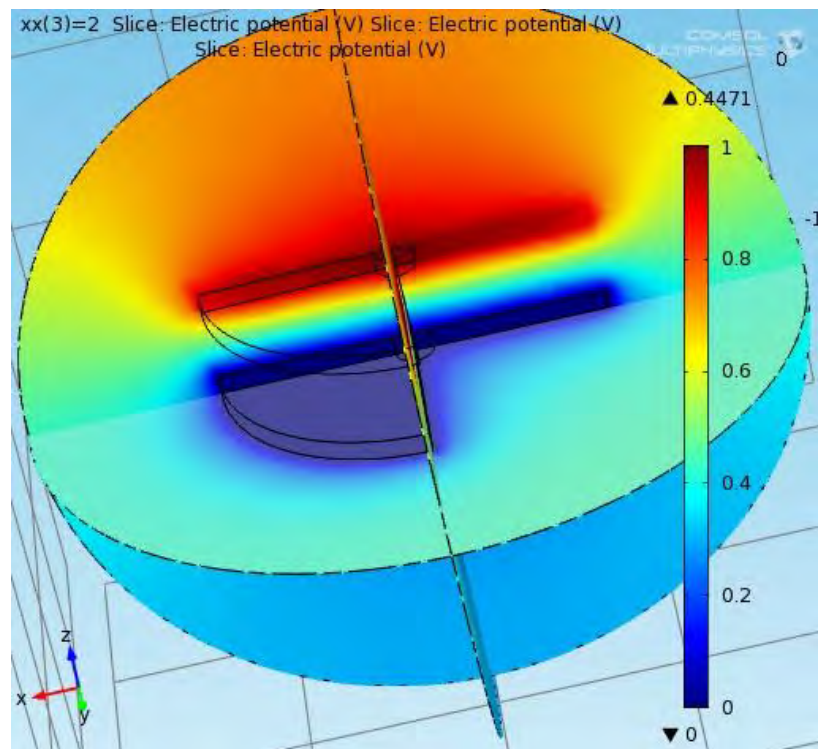


Рис 1.17

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

На рис 1.18 зображений графік зміни ємності сенсора діаметром 3 см в залежності від кута повороту одного з електродів.

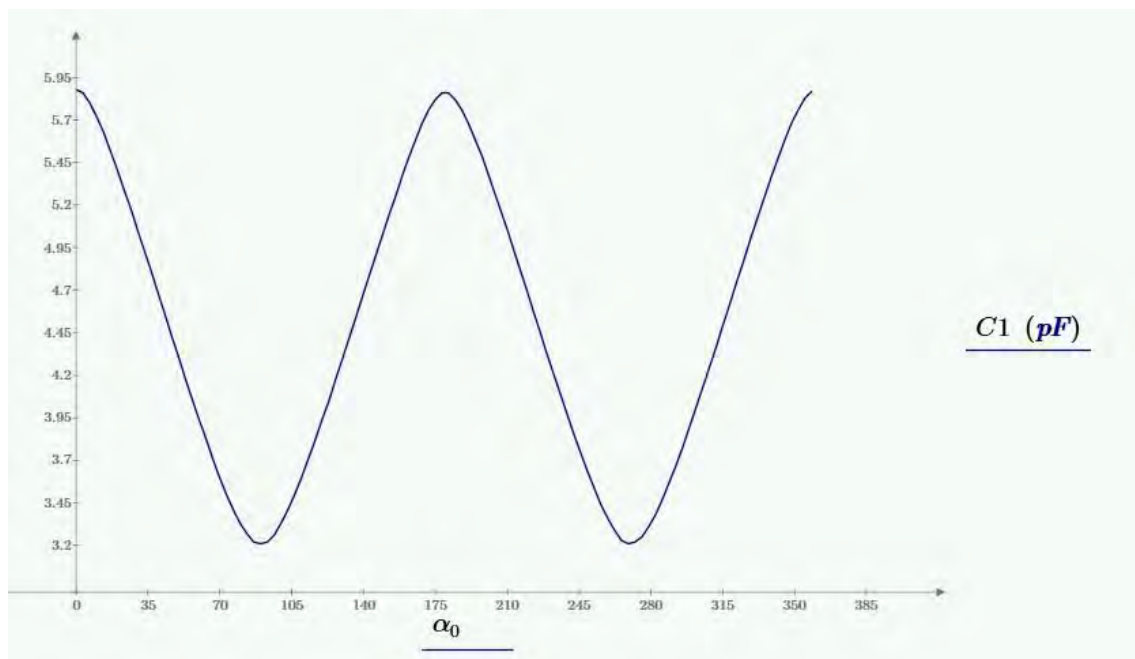


Рис 1.18

Видно що ємність змінюється не лінійно, тому було проведено моделювання сенсорів з більшими геометричними розмірами, а саме з діаметрами 6 см і 12 см. Результати моделювання зображені на рис 1.19.

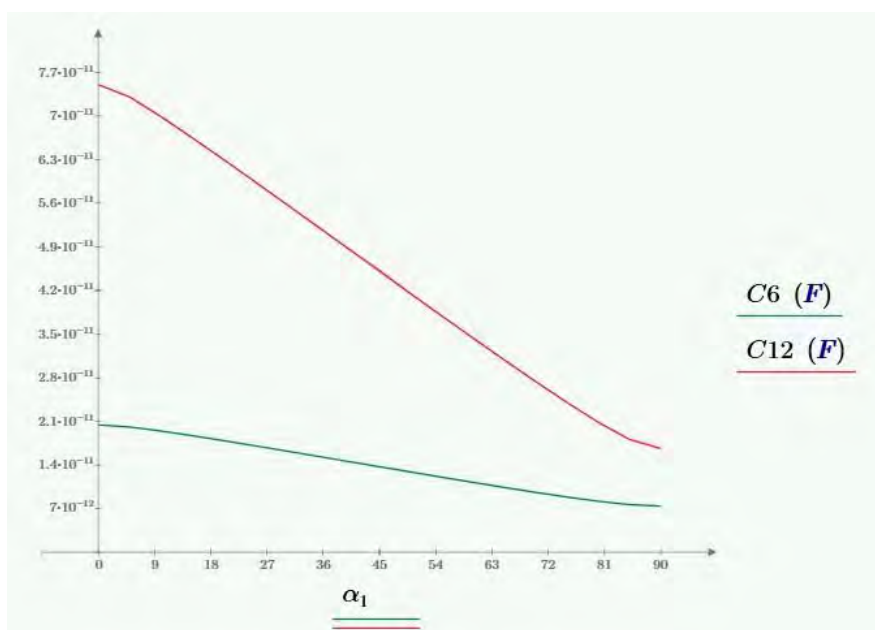


Рис 1.19

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для порівняння результатів від різних моделей дані були нормалізовані таким чином щоб не враховувати мінімальну ємність та різницю в максимальному перепаді ємності, тобто:

$$C_j = (C_j - C_{bjk}) / (C_{b@:} - C_{bjk}) \quad (1.38)$$

Результати представлені на рис 1.20, де:  $C_{;1}$  – нормалізована зміна ємності сенсора діаметром 12 см,  $C^m$  – нормалізована зміна ємності сенсора діаметром 6 см,  $C_;$  – нормалізована зміна ємності сенсора діаметром 3 см,  $C_{jk}$  – нормалізована зміна ємності сенсора для моделі  $C(t) = C_c + C_b(1 - \frac{1}{\beta})$ ,  $C_{\{i} -$  нормалізована зміна ємності сенсора для моделі  $C(t) = C_c + C_b \cos \omega t$

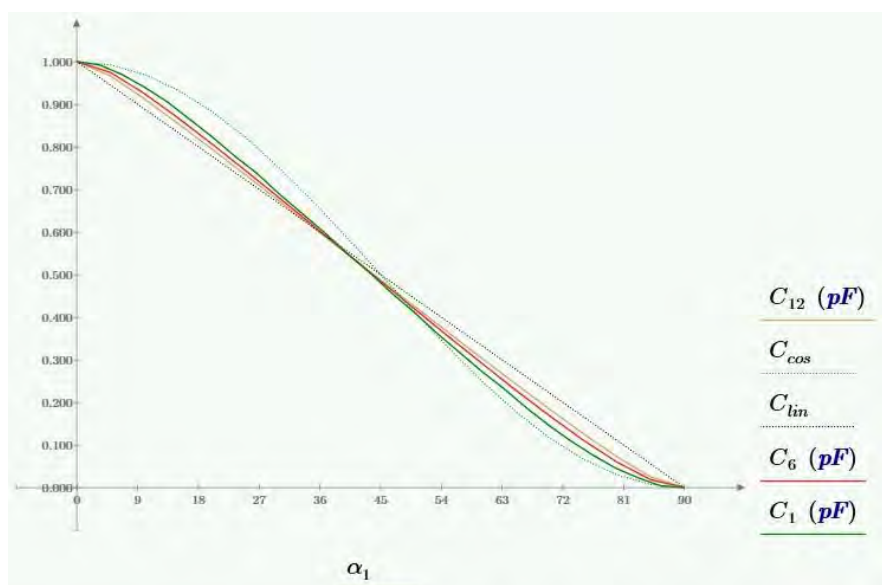


Рис 1.20. - Нормалізована зміна ємності сенсора при радіусах 1 см, 6 см, 12 см.

Результати моделювання показали що при збільшенні геометричних розмірів сенсора, вплив крайових ефектів поля на величину ємності зменшується, і характер зміни ємності при обертанні сенсора стає лінійним, в той же час при зменшенні геометричних розмірів сенсора вплив крайових ефектів посилюється і закон зміни ємності наближається до гармонічного, при цьому в обох випадках закон зміни площі перекриття верхнього та нижнього електродів лінійний. На рис 21 зображено графік залежності похибки спрощеної моделі  $C(t) = C_c + C_b(1 - \frac{1}{\beta})$  та результатів моделювання зміни ємності сенсора від

кута повороту екрануючого електроду, де  $E1l$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 3 см, де  $E6l$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 6 см, де  $E12l$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 12 см. На рис 1.22 зображено графік залежності похибки спрощеної моделі  $C(t) = C_c + C_b \cos \omega t$  та результатів моделювання зміни ємності сенсора від кута повороту екрануючого електроду, де  $E1h$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 3см, де  $E6h$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 6 см, де  $E12h$  – різниця у процентах для сенсора з діаметром 12 см.

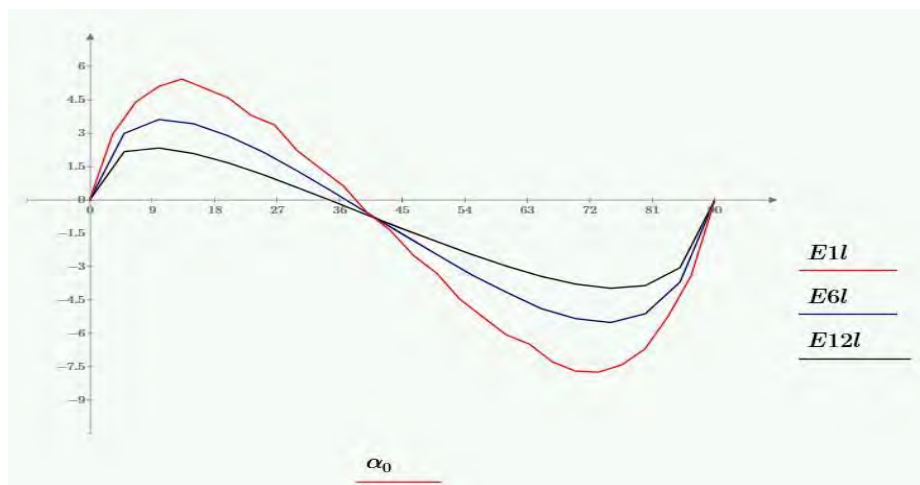


Рис 1.21. - Різниця між результатами моделювання та лінійним законом зміни ємності

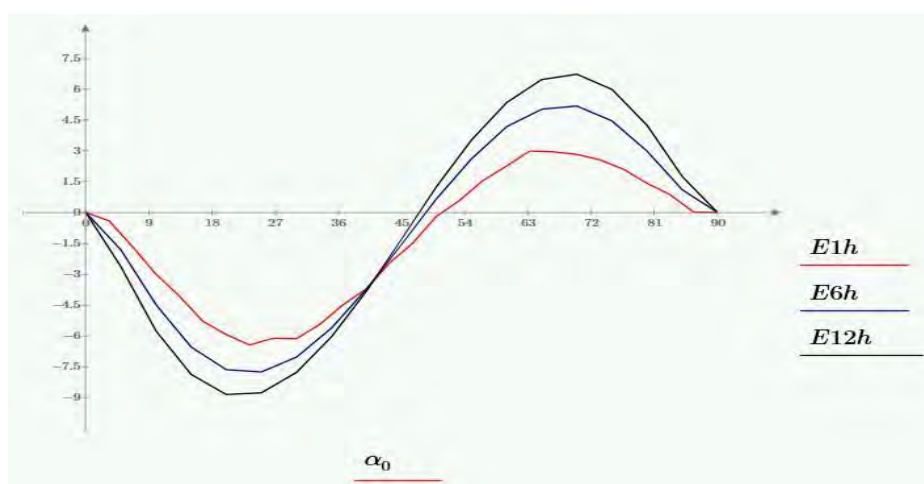


Рис 1.22. - Різниця між результатами моделювання та гармонічним законом зміни ємності

При моделюванні кожен з електродів сенсору зображеного на рис 1.16 складався з двох секторів кола площею  $\frac{1}{4}$  площі кола, а при збільшенні кількості секторів площа кожного з них буде зменшуватись пропорційно їх кількості, а це в свою чергу призведе до збільшення впливу крайових ефектів та наближенню закону зміни ємності до гармонічного. Для встановлення точного закону зміни ємності для конкретного сенсора необхідно проводити його моделювання з врахуванням особливостей конструкції, таких як форма електродів сенсору, форма та розміщення елементів корпусу та їх матеріал. Адже саме закон зміни ємності буде визначати форму сигналу від сенсора, а в загальному випадку для найпростішого двосекторного модулятора при радіусі сенсора більше 3 см можна використовувати лінійний закон зміни ємності, в той же час при діаметрі сенсора менше 6 см – гармонічний закон, адже в цих діапазонах похибка від використання спрощеного закону зміни ємності буде складати 5% і менше, наближаючись до реального значення при збільшенні площі для лінійного закону, і зменшенні площі для гармонічного закону. Наприклад у сенсора з діаметром 12 см результати моделювання відрізнялись від лінійного закону зміни ємності на 3%, а від гармонічного закону зміни ємності на 9%. Для сенсора з діаметром 3 см результати моделювання відрізнялись від лінійного закону зміни ємності на 8%, а від гармонічного закону зміни ємності на 5%.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## 2. Розрахункова частина

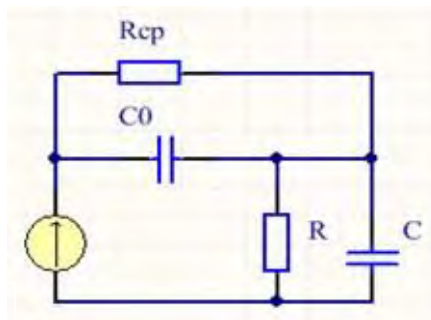


Рис. 2.1 Еквівалентна схема електричного перетворювача

Де  $C_0$  - власна ємність зонда (або пластин);  $C$  - ємність вимірювальної схеми;  $R_{cp}$  - опір середовища обумовлене іонними струмами середовища;  $R$  - опір вимірювальної схеми.

Найбільш простим є статичний метод вимірювання, який з'явився з появою механічних електрометрів.

Для аналізу схеми в цьому випадку ємністю зонда  $C_0$  можна знехтувати, тоді вимірюється напруга на вході вимірювача буде по закінченню перехідних процесів пов'язаних з зарядом ємності  $C$  струмами провідності середовища (іонними струмами) визначається з виразу:

$$U_{\dot{e}} = \frac{Q[\dot{e}]}{\dot{e}g_{\dot{e}}\tau_{\pm}} \quad (2.1)$$

Але, ця напруга на вході вимірювального ланцюга згідно з другим законом комутації з'явиться не одразу. Розрахуємо цей час:

Відомо, що опір повітря, обумовлене іонними струмами, знаходиться в межах:

$$R_{\{\dot{e}\}} = 10^{17} \text{ Ом}$$

Припустимо, що використовуємо механічний електрометрії опір  $R$ , в цьому випадку визначається опором ізоляторів до яких кріпиться зонд і воно може бути:

$$R = 10^{11} \text{ Ом}$$

ємність:

$$C = 1 \text{ пФ}$$

Припустимо також, що зонд знаходиться на висоті 1 м і напруженість:

$$E = 100 \text{ В/м}$$

Тоді отримуємо  $U_R=1 \text{ В}$ . А час вимірювання:

$$t = 4R_{\epsilon}C = 4 \times 10^4 \text{ сек} \cong 11 \text{ г}$$

Час надто великий тому використовують спеціальні зонди(колектори), котрі крім своєї основної функції ще й збільшують провідність середовище біля себе. Це колектори з радіоактивними ізотопами, які працюють за рахунок коронного розряду. Час виміру з використанням таких колекторів значно менший і може варіюватись від 10 до 60 секунд. Тому вимірювачі електричної напруженості, які реалізують статичний принцип вимірювання використовуються тільки для вимірювання електричної напруженості змінних полів промислової частоти.

Для аналізу роботи вимірювального перетворювача електричної напруженості змінної частоти в приведеній еквівалентній схемі рис. 2.1, з достатньою точністю можна знехтувати резистором  $R_{cp}$ , будемо враховувати тільки ємність  $C_0$  зонда. Таким чином за рахунок змінного електричного поля на пластинах індуються заряди з частотою мереж, що призводить до появи змінного току в вимірювальному ланцюгу. Можна показати, наприклад якщо ємність зонда:

$$C_c = 20 \text{ пФ}$$

То на частоті мережі 50 Гц, опір:

$$Z_c = 159 * 10^3 \text{ Ом}$$

Що значно менше  $R_{cp}$ , тому чутливість таких вимірювачів напруженості змінного електричного поля, збільшується в декілька разів.

Динамічний метод вимірювання електричної напруженості поля передбачає модуляцію постійного електричного поля, перетворюючи його з постійного в змінне шляхом перемінного експонування та екранування вимірювальних пластин. Таким чином, принцип роботи вимірювального перетворювача буде такий же як для поля змінної частоти (в еквівалентній схемі рис. 2.1 тепер джерело напруги буде змінним). Відомо, що під дією

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричної напруженості  $E$  у відкритій пластині яка є частиною конденсатора  $C$  з площею  $S$  буде наводитися (індукувати) заряд рівний:

$$Q = \frac{Q \cdot X}{uv} \quad (2.2)$$

Якщо площа пластини буде незмінною ( $S = \text{const}$ ), то струм в резисторі  $R$  згідно з рівнянням

$$i = \frac{IV}{\Gamma} \quad (2.3)$$

буде відсутнім.

Якщо розглядати динамічний (ротаційний) метод вимірювання, представлений на рис. 2.2, то можна переконатися, що

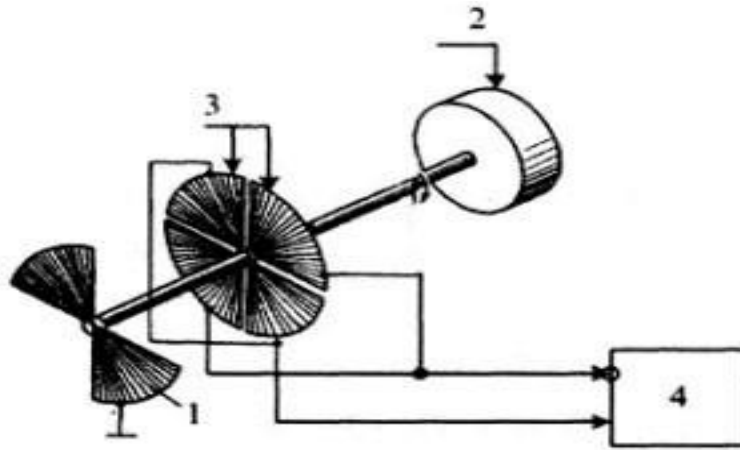


рис. 2.2 - Блок схема вимірювального перетворювача ротаційного типу заземлена пластина 1 поперемінно екранує і експонує дві пари вимірювальних пластин 3 підключених до входів диференціального підсилювача 4 і відповідно в пластинах змінюється індукований заряд який відповідно викликає змінний струм в резисторах  $R$ , умовно визначених двома диференціальними входами підсилювача 4. Неважко показати, що за період обертання  $T$  заземленої пластини 1 в наведеній на рис. 2.2 схемі струм поміняє свій напрямок 4 рази. Звідси можна зробити висновок, що розглянутий на рис. 2.2 динамічний спосіб вимірювання дозволяє виконувати одне повноцінне вимір напруженості електричного поля за час, що не перевищує половини періоду обертання двигуна, що на кілька порядків може перевищувати час вимірювань статичними методами (навіть з використанням радіоактивних колекторів).

																				Арк	
																					49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата																	

Тому з огляду на вищесказане, (а саме високу швидкість вимірювань, висока чутливість) для реалізації поставлених вище вимог для вимірювача напруженості електричних полів за доцільне використовувати динамічний метод вимірювання.

### 3. Вибір елементів функціональної схеми

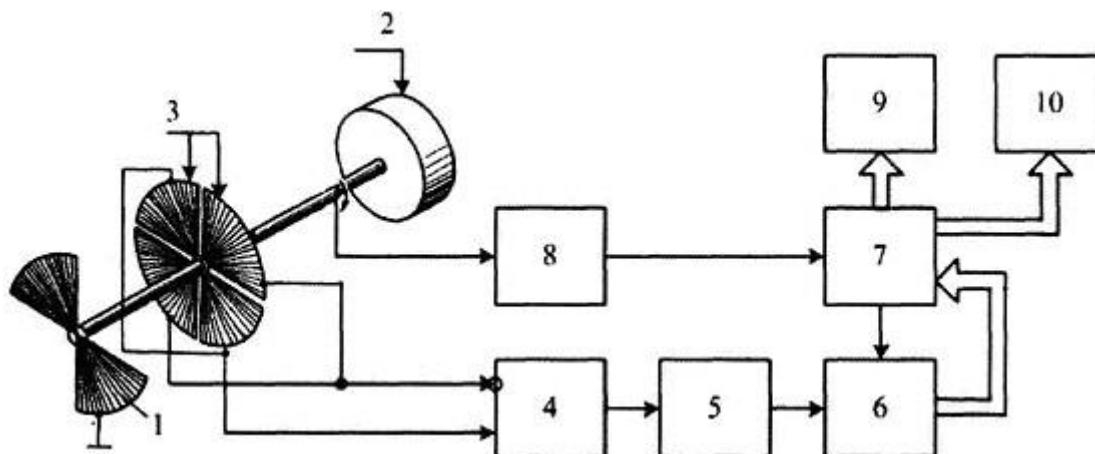


Рис.3.1 - Функціональна схема цифрового вимірювача електричної напруженості:

1- екранізуюча пластина; 2 – електродвигун; 3- дві пари вимірювальних пластин; 4- диференціальний підсилювач; 5- фільтр; 6- аналогово-цифровий перетворювач; 7- мікроконтролер; 8- датчик синхросигнала положення пластини; 9- цифровий дисплей; 10- модуль безпроводної передачі цифрової інформації.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.1. Вибір підсилювача

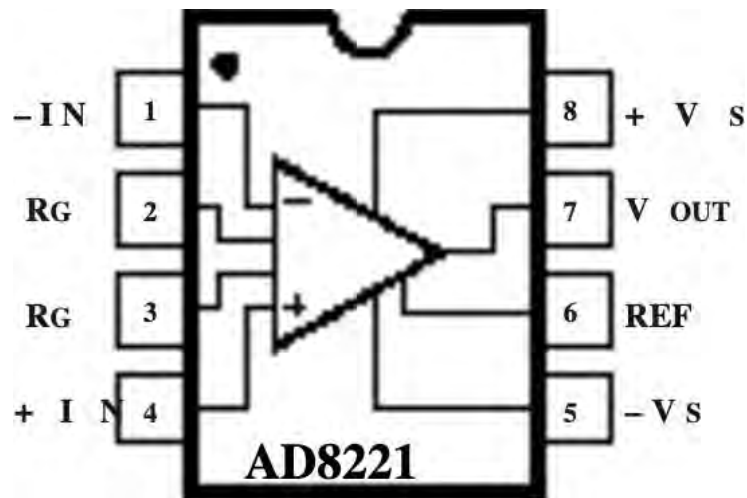


Рис.3.2 - Схема включення підсилювача:

AD8221 є програмованим підсилювачем високої продуктивності. Програмоване підсилення забезпечує гнучкість дизайну користувача. Одиночний резистор встановлює коефіцієнт підсилення від 1 до 1000. AD8221 працює як з одним так і з подвійним джерелом живлення і добре підходить для застосування, де зустрічаються вхідні напруги  $\pm 10$  В.

### 3.2. Вибір мікроконтролера

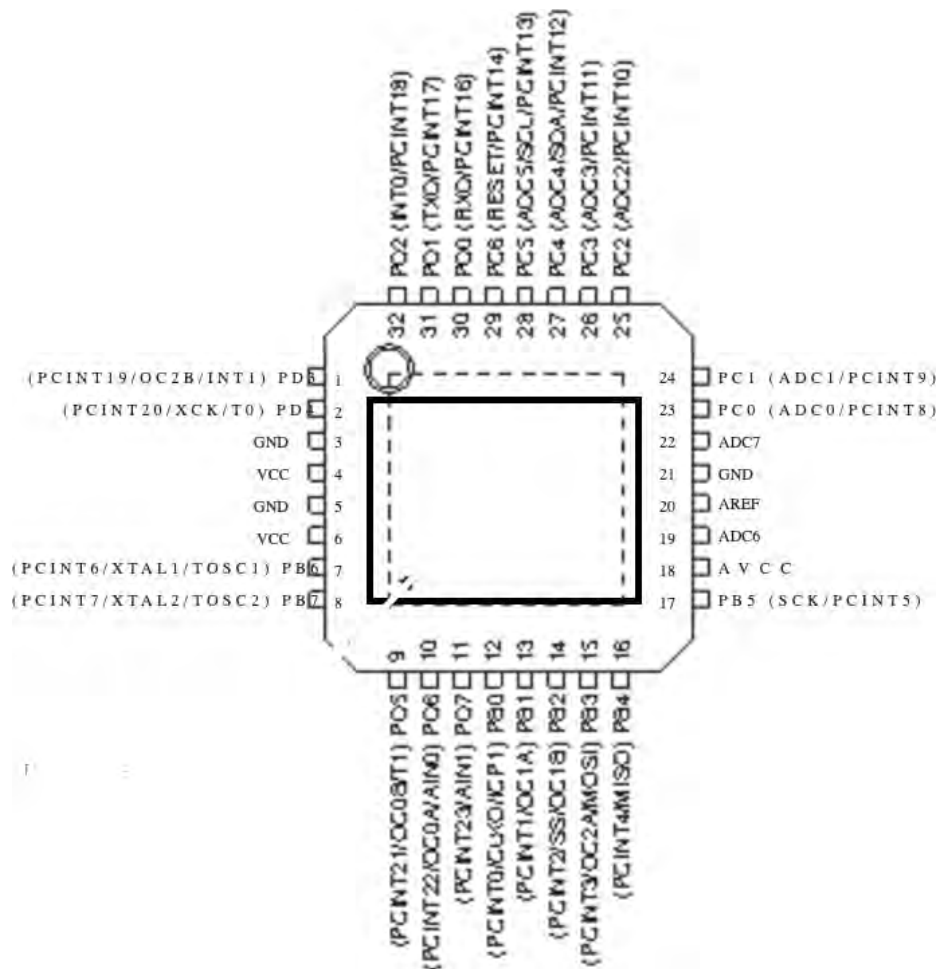


Рис.3.3 - Мікроконтролер ATmega168\_32PIN.

ATmega168 є 8-розрядним мікроконтролером малої потужності CMOS, заснованим на розширеній архітектурі AVR RISC. Виконуючи потужні інструкції в одному тактовому циклі, ATmega168 досягає пропускну здатності, що наближається до 1 MIPS на МГц, що дозволяє системному дизайнеру оптимізувати споживання енергії в порівнянні зі швидкістю обробки.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

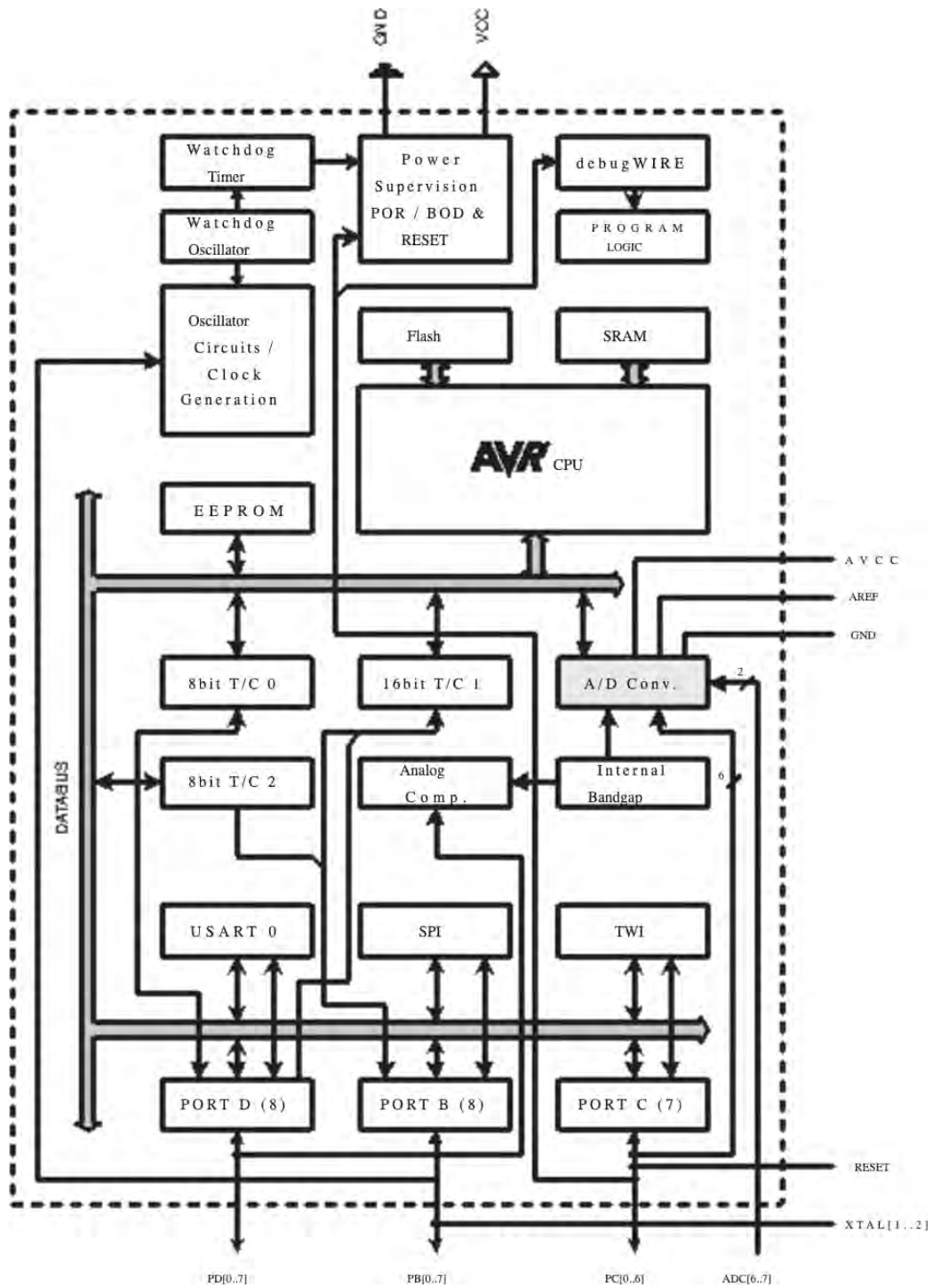


Рис. 3.4 - Блок-схема роботи мікроконтролера

Так як 10-ти розрядний АЦП вже вбудований в мікроконтролер тому на його підбрати не потрібно. Порахуємо похибку АЦП:

$$\delta = \frac{1}{2^C} = 0.00097.$$

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

### 3.3. Вибір дисплея

Для того щоб побачити результати вимірювання одразу потрібно обрати дисплей. Обираємо AG12232B.



Рис. 3.5 - Зовнішній вигляд дисплея

#### Основні характеристики

Роздільна здатність: Гор., Піксель 122

Роздільна здатність: Верт., Піксель 32

Розміри: Ш, мм 65.8

Розміри: В, мм 27.1

ТипDisplay FSTN STN

Контроллер SBN1661G

TA, ° C від -20 до 70

TS, ° C від -30 до 80

VCC, В от 4.5 до 5.5

ICC, mA 0.5

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



## Висновок

В ході роботи було проаналізовано можливі методи та засоби вимірювання електростатичного поля.

Також було розраховано та спроектовано малогабаритний пристрій для вимірювання електростатичного поля. Він призначений для легкого транспортування та автономної роботи для вирішення задач пошуку (корисних копалин, покладів нафти, підземних водосховищ та ін.) та простого вимірювання електростатичного поля з можливістю передачі даних на віддалений ПК.

Було обрано елементи мікросхеми, розроблено складальний кресленик, виконано деталювання.

Виконано всі необхідні розрахунки та похибки.

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

## Список літератури

[1]. Имянитов И. М., Приборы и методы для изучения электричества атмосферы, М., 1957.

[2]. Метод и аппаратура для измерения напряжённости электрических полей при геолого-геофизических исследованиях / В.Г. Баженов, Н.А. Якимчук, С.В. Грузин, И.С. Пидлисна // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. пр. — 2014. — Вип. 11. — С. 17-29. — Бібліогр.: 11 назв. — рос.

[3]. Bazhenov V. Mathematical Model Electro Capacitive Methods of Nondestructive Testing / Ivitska D.K. Bazhenov V.G., Ivitskiy I.I. // SWorld Journal, 2017. – Vol. 13 - pp. 185-189

[4]. А.с. 1493964 СССР МКИ G01 29/08 «Способ измерения параметров электромагнитного поля» / В.Г. Болдырев, В.В. Бочаров, В.Л. Булеков, В. Л. Головкин, А.А. Ковзан, С.Б. Резников, В.В. Савостьянов / №4281857/24-09 Заявлено 13.07.87 Опубликовано 15.07.89 Бюл. №26

[5]. А.с. 319905 СССР МКИ G01 19/10 «Способ исследования электрического поля» / С.И. Павлов - №1378348/26-25 Заявлено 24.11.1969 Опубликовано 02.11.1971 Бюл. №33

[6]. Bruce T. Williams High speed electrostatic voltmeter U. S. patent no. 4205267, 1980

[7]. Mark Ellery Ogram Atmospheric static electricity collector U. S. patent no. US8102082, 24 Jan 2012

[8]. Johan A. Govaert, Atmospheric potential measurement device US4950978 A, 1990

[9]. Andor Palencsar, Apparatus for collecting atmospheric electricity, U. S. Patent no. US674427, 1900

[10]. Russell D Shelton, Electron beam instrument for measuring electric fields, U. S. Patent no. US3470466, 1969

[11]. Бирюков С. В. Физические основы измерения параметров электрических полей/ Бирюков С.В Омск СибАДИ 2008 -112с.

[12]. Jody A. Swenson, William H. Beasley, Leon G. Byerley, Ivan G. Bogoev, Electric-field meter having current compensation, U. S. Patent no. US7256572, 2007

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

[13]. T Ohno, H Sasaki, Electrostatic field measuring apparatus, U. S. Patent no. US3846700, 1974

[14]. Michael F. Stewart, Electric field measuring system, U. S. Patent no. US5315232, 1994

[15]. А.с. 1288630 СССР МКИ G01 29/12 «Способ измерения электростатического поля» / К.С. Жупахин, В.С. Жупахин, Ю.П. Михайловский №3789010/24-21 Заявлено 05.09.1984 Опубликовано 07.02.1987 Бюл. №5

[16]. А.с. 1257567 СССР МКИ G01 29/12 «Способ измерения электростатического поля» / К.С. Жупахин - №3786094/24-21 Заявлено 28.08.1984 Опубликовано 15.09.1986 Бюл. №34

[17]. Bruce T. Williams, High speed electrostatic voltmeter, U. S. Patent no. US4205267, 1980

[18]. Jerzy Kieres, Toshio Uehara, Bruce T. Williams, Sensor for non-contacting electrostatic detector, U. S. Patent no. US6600323, 2003

[19]. Osamu Akiyama, Surface electric potential sensor drive and induction noise cancellation circuit, U. S. Patent no. US5600251, 1997

[20]. Few Arthur A, Electric field sensor, U. S. Patent no. US3925726, 1975

[21]. Nilton O. Renno, Steven A. Rogacki, Rotating electric-field sensor, U. S. Patent no. US8536879, 2013

[22]. N O Renno, J F Kok, H Kirkham, and S Rogacki, A miniature sensor for electrical field measurements in dusty planetary atmospheres, journal of Physics: Conference Series 142 (2008) 012075

[23]. А.с. 1509758 СССР МКИ G01 29/12 «Измеритель напряженности статических и квазистатических электрических полей» / Ю.Г. Пехтерев, В.В. Канюшкин, В.А. Кочнев - №4306040/24-09 Заявлено 14.09.1987 Опубликовано 23.09.1989 Бюл. №35

[24]. Simon Ghionea, Gabriel Smith, Jeffrey Pulskamp, Sarah Bedair, Christopher Meyer, and David Hull, MEMS Electric-Field Sensor With Lead Zirconate Titanate (PZT)-Actuated Electrodes, Sensors and Electron Devices Directorate US Army Research Laboratory Adelphi, MD USA, SENSORS, 2013 IEEE 1930-0395

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[25]. Chunrong Peng and Shanhong Xia, A Novel Micro-Electrostatic Field Sensor Based on Parallel-Plate Resonator, SENSORS, 2009 IEEE 978-1-4244-4630- 8/09/

[26]. Chao Ye, Chunrong Peng, Xianxiang Chen, Shanhong Xia, A Micromachined Electrostatic Field Sensor with Vertical Thermal Actuator, IEEE SENSORS 2006, 1 -4244-0376-6/06/

[27]. T. Kobayashi, S.Oyama, H. Okada, N. Makimoto, K. Tanaka, T. Itoh, and R. Maeda, an electrostatic field sensor driven by self-excited vibration of sensor/actuator integrated piezoelectric micro cantilever, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Japan Hirose Electric Co., Yokohama, Japan

[28]. Chunrong Peng, Xianxiang Chen, Qiang Bai, Lei Luo, Shanhong Xia, A Novel High Performance Micromechanical Resonant Electrostatic Field Sensor Used In Atmospheric Electric Field Detection, Micro Electro Mechanical Systems, 2006 p.p. 698-701

[29]. В. С. Аксельрод, В. А. Мондрусов, К. Б. Щигловский, Методы и средства измерения напряженности и потенциала электрического поля

[30]. Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits, Application Report, Texas Instruments 2007

[31]. Tony Chan Carusone, David A. Johns, Kenneth W. Martin./ Analog integrated circuit design —2nd ed.

[32]. J. A. BARNES AND D. W. ALLAN - A Statistical Model of Flicker Noise/ PROCEEDINGS OF THE IEEE VOL. 54, NO. 2 1966

[33]. Протасов, А. Г. Метрологія, стандартизація та сертифікація в неруйнівному контролі [Електронний ресурс] : навчальний посібник з дисциплін «Метрологія» та «Сертифікація і стандартизація» / В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,04 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2015. – 266 с.

[34]. Gino Giusi, Felice Crupi, Calogero Pace, and Paolo Magnone/ Full Model and Characterization of Noise in Operational Amplifier/ IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS, VOL. 56, NO. 1, JANUARY 2009

					ПК51.02.0000.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

*Додатки*

## Технічне завдання

### 1. Найменування приладу.

„Прилад для вимірювання електростатичного поля”.

### 2. Мета виконання дипломного проекту та призначення приладу.

Розробка приладу для вимірювання електростатичного поля

### 3. Передумови для розробки приладу.

Дана розробка виконується відповідно до тематики дипломного проектування, затвердженої кафедрою приладів та систем неруйнівного контролю приладобудівного факультету НТУУ „КПІ”.

### 4. Вимоги до технічних характеристик.

Основні параметри:

- Малогабаритність;
- Миттєві вимірювання;
- Передача даних на віддалені ПК;
- Границя допустимої основної похибки – не більше 5%;

### 5. Робочі умови експлуатації приладу.

Номінальне значення кліматичних факторів відповідно до ДСТУ 12.005-88:

- температура навколишнього середовища  $-20...40^{\circ}\text{C}$ ;
- відносна вологість 65% при температурі навколишнього середовища  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- атмосферний тиск  $750\pm 30$  мм.рт.ст.

### 6. Вимоги до конструкції приладу.

Система повинна зберігати працездатність й свої параметри відповідно до ДСТУ 17516-72.

6.1. Конструкція системи повинна забезпечувати зручний доступ до всіх елементів, вузлів та блоків, які потребують замін в процесі експлуатації.

6.2. Система повинна мати мінімальну необхідну кількість органів управління, регулювання та керування:

6.2.1. органи багаторазового або частого використання повинні знаходитись на передній панелі керування системою;

6.2.2. органи, які використовуються для одноразового налагодження системи або зміна положення яких є небажаною, мають бути розташовані всередині загального корпусу системи або на задній малодоступній панелі.

6.3. Використані покупні вироби та матеріали, під час випробування системи повинні мати невикористаний ресурс, термін служби та термін схоронності яких не менше ресурсу й терміну служби системи.

## **7. Техніко-економічні вимоги.**

7.1. Передбачається виготовлення одного дослідного зразка приладу.

7.2. Орієнтовна ціна дослідного зразка системи повинна бути розрахована до початку проведення робіт.

## **8. Вимоги до упаковки.**

8.1. Транспортна упаковка повинна забезпечувати збереження приладу при транспортуванні та збереженні.

8.2. Коробку з приладом розміщують в транспортному ящику:

Простір між стінками ящика і коробки заповнюють пакувальним амортизаційним матеріалом.

## **9. Стандартизація та уніфікація.**

До системи повинна бути прикладена експлуатаційна документація відповідно ДСТУ 25565-94.

## **10. Вимоги до техніки безпеки.**

10.1. Вимоги до безпеки конструкції, електробезпеки керування та обслуговування системи повинні відповідати ДСТ 122007-75 та ДСТУ 123019-80.

10.2. Середній час без відмовлень роботи системи, повинен бути не менше 500 год.

## **11. Строк зберігання, служби та технічний ресурс.**

11.1. Прилад повинен витримувати зберігання протягом 3 років.

11.2. Строк служби 5 років.

11.3. Технічний ресурс 1000 год.