

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет  
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
Володимир ЄРЕМЕНКО  
«\_\_\_» червня 2023 р.

**Дипломний проект  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні  
технології та системи»  
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»  
на тему: «Автоматизована система контролю джерел збудження  
електричного поля»**

Виконав:  
студент IV курсу, групи ПА-91  
Завалістий Максим Ігорович

\_\_\_\_\_

Керівник:  
Доцент, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович

\_\_\_\_\_

Консультант із нормоконтролю  
Доцент, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович

\_\_\_\_\_

Рецензент:  
асистент, к.т.н.  
Котляр Світлана Сергіївна

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

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

<b>Факультет</b>	<i>Приладобудівний</i>
<b>Кафедра</b>	<i>Інформаційно-вимірювальних технологій</i>
<b>Рівень вищої освіти</b>	<i>Перший (бакалаврський)</i>
<b>Спеціальність/освітня програма</b>	<i>Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Інформаційні вимірювальні технології та системи</i>

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ ЄРЕМЕНКО В. С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект студента**

Завалістого Максим Ігоровича

- Тема проекту:** Автоматизована система контролю джерел збудження електричного поля.  
керівник проекту Самарцев Юрій Миколайович, к.т.н., доц.,  
затверджені наказом по університету від “\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_
- Термін подання студентом проекту** \_\_\_\_\_
- Вхідні дані до проекту** Діапазон напруженості електричного поля – від 8мкВ/м до 36мкВ/м, похибка вимірювання напруженості <5%, напруга живлення 12 В, інтерфейс RS232, кількість проєкцій – 3, частотний діапазон 0,05...100Гц.
- Зміст пояснювальної записки** Вступ. Огляд існуючих технічних рішень. Вибір та обґрунтування обраного рішення, Розроблення структурної схеми. Розроблення функційної схеми. Розроблення

принципової схеми.

5. **Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):** Схема електрична структурна. Схема електрична функційна. Схема електрична принципова.

6. **Консультанти розділів проекту**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.			
2.			

7. **Дата видачі завдання 23.02.2023 р.**

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

<b>Назва етапів проекту та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання</b>	<b>Термін виконання етапів</b>	<b>Позначки керівника про виконання завдань</b>
Розроблення та узгодження технічного завдання	23.02.2023 р.	
Огляд і аналіз існуючих технічних рішень	13.03.2023 р.	
Вибір та обґрунтування обраного рішення	27.03.2023 р.	
Розроблення структурної схеми	10.04.2023 р.	
Розроблення функційної схеми	24.04.2023 р.	
Розроблення принципової схеми	08.05.2023 р.	
Оформлення графічних матеріалів	22.05.2023 р.	
Оформлення пояснювальної записки	02.06.2023 р.	
Перевірка на антиплагіат	10.06.2023 р.	
Попередній захист дипломного проекту	12.06.2023 р.	
Захист дипломного проекту	19.06.2023 р.	

Студент

Завалістий М. І.

Науковий керівник  
«\_\_» червень 2023р.

Самарцев Ю.М.

## АНОТАЦІЯ

В даному дипломному проєкті розроблена автоматизована система контролю джерел збудження електричного поля з метою вимірювання параметрів електричного поля, а саме напруженості, напрямку та розподілу, які можуть відрізнятися в залежності від джерела збудження.

В дипломному проєкті був проведений огляд існуючих технічних рішень, обрано та обґрунтовано обрані рішення, розглянуто принцип дії системи, розроблено структурну, функційну та принципову схеми.

Графічна частина проєкту представлена на трьох аркушах формату А1 і містить:

- схему електричну структурну автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля;
- схему електричну функційну автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля;
- схему електричну принципову автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля.

## ANNOTATION

In this graduation project, an automated system for monitoring electric field excitation sources was developed to measure electric field parameters, namely, intensity, direction, and distribution, which may differ depending on the excitation source.

In this graduation project existing technical solutions, selected and justified the chosen solutions, considered the principle of operation of the system, and developed a structural diagram, a function diagram, and a schematic diagram.

The graphic part of the project is presented on three A1 sheets and includes:

- electrical structural diagram of the automated system for monitoring electric field excitation sources;
- electrical function diagram of the automated system for monitoring electric field excitation sources;
- electrical schematic diagram of the automated system for monitoring electric field excitation sources.

**Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту  
на тему: “Автоматизована система контролю джерел збудження  
електричного поля”**

Київ - 2023 року

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	3
ВСТУП	4
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	6
1.1 Модель джерела електричного поля у вигляді диполя.	6
1.2 Огляд первинних вимірювальних перетворювачі (датчики, сенсори) напруженості електричного поля	8
1.2.1 Електричні сенсори від компанії Ultra Electronics	10
1.2.2 Електричні сенсори від компанії Polyamp	12
1.3 Види джерел електричного поля	16
1.3.1 Вимірювання та розташування сенсорів	18
Висновок до розділу 1	23
2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНОГО РІШЕННЯ	24
Висновок до 2 розділу	28
3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ	28
Висновок до 3 розділу	30
4 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІЙНОЇ СХЕМИ	30
Висновок до 4 розділу	33
5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	33
Висновок до 5 розділу	41
6 РІВНЯННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ	42
6.1 Рівняння функції перетворення	42
6.2 Аналіз невизначеності результатів вимірювання	44
Висновок до 6 розділу	46
ВИСНОВОКИ	46
ЛІТЕРАТУРА	47

<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Завалістий М. І.		
Перевір.		Самарцев Ю.М.		
Н. Контр.		Самарцев Ю.М.		
Затверд.		Єременко В. С..		
<i>Автоматизована система контролю джерел збудження електричного поля. Пояснювальна записка</i>				
		Лім.	Арк.	Акрушіє
		2	49	
<i>НТУУ «КПІ» ПБФ, гр. ПА-91</i>				

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПВП МП – первинний вимірювальний перетворювач магнітного поля

ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач

МК – мікроконтролер

БЖ – блок живлення

БПІ – блок перетворення інтерфейсів

ПК – персональний комп'ютер

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

USART – Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter  
(Універсальний синхронний/асинхронний приймач-передавач)

COM-порт – communications port (послідовний порт)

					ПА91.030008.001 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Електричне поле є одним із фундаментальних понять електродинаміки та електротехніки, і має важливе значення для багатьох сфер науки та техніки. Одним з основних завдань у дослідженні електричних полів є контроль їх параметрів, таких як напруженість, напрям та розподіл.

Мета даної дипломної роботи - розробка автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля. Основною метою системи є вимірювання параметрів електричного поля, а саме напруженості, напрямку та розподілу, які можуть відрізнятися в залежності від джерела збудження.

Об'єктом дослідження є електричне поле, що формується під впливом різноманітних джерел, таких як електромагнітні хвилі, струми в провідниках, іонізуюче випромінювання, електричні машини та інші пристрої. Як природа джерела збудження, так і відстань до нього та навколишнього середовища впливає на характеристики електричного поля.

Основними параметрами, які характеризують електричне поле, є напруженість та напрям. Напруженість електричного поля визначається відношенням електричної сили до заряду, що її створює. Напрямок електричного поля визначається напрямом, в якому рухається позитивний заряд під його впливом. Розподіл електричного поля може бути нерівномірним і залежати від форми та розмірів джерела збудження, а також від властивостей середовища, в якому воно розповсюджується.

Одним із важливих застосувань контролю параметрів електричного поля джерел є ідентифікація параметрів джерел збудження на рухомих об'єктах. Наприклад, електричні станції, електромережі, медичні технології та інші пристрої пов'язані з певними рівнями напруженості електричного поля, які можуть бути небезпечними для здоров'я або навіть спричинити пошкодження обладнання. Тому вимірювання та контроль параметрів електричного поля є необхідними для запобігання можливих негативних наслідків.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		4

Для досягнення мети дипломної роботи, необхідно використовувати різноманітні методи та інструменти, такі як сенсори, аналізатори сигналів, комп'ютерне програмне забезпечення тощо. Розробка автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля сприятиме ефективнішому контролю параметрів електричного поля, що зменшить ризик можливих негативних наслідків та сприятиме безпеці людей та обладнання.

Отже, дана дипломна робота має важливе значення використання процесу вимірювання параметрів електричного поля для виявлення параметрів об'єктів з джерелами електричного поля, наприклад координати об'єктів, моментів джерел які на об'єкті знаходяться. Також для розвитку технологій контролю параметрів електричного поля та їх застосування для забезпечення безпеки людей та обладнання. Розробка автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля дозволить забезпечити ефективний та точний контроль параметрів електричного поля, що має важливе значення для розвитку сучасної електротехніки та електродинаміки.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

# 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

Електричне поле виникає в результаті наявності зарядів у просторі. Коли заряджений об'єкт, такий як електрон або протон, знаходиться в певній точці простору, він створює електричне поле, яке поширюється навколо нього. Це поле може впливати на інші заряджені частинки, розташовані у його околицях. Найпоширенішою моделлю для опису електричного поля є модель електричного диполя.

## 1.1 Модель джерела електричного поля у вигляді диполя.

Електричний диполь - це система з двох електричних зарядів різної полярності, розділених на відстань  $d$ . Загальна зарядженість диполя дорівнює нулю, оскільки величина зарядів однакова, але знаки протилежні. Однак, у наявності зовнішнього електричного поля, електричний диполь може зазнавати взаємодії з цим полем і виконувати рух. Залежність взаємодії нерухомих зарядів з джерелом електричного поля дає можливість вимірювати параметри його, використовуючи диполь.

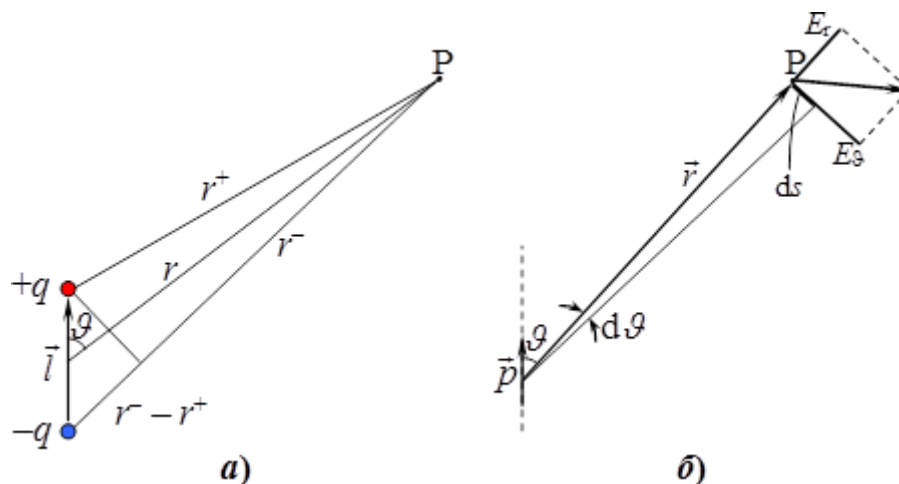


Рис. 1 Напруженість електричного поля створеного диполем

Електричний диполь утворюється в результаті розряду електрично нейтрального тіла, наприклад: атома, молекули або кристала. У молекулах

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

електричний диполь зазвичай зустрічається у формі електричного диполя через різницю в зарядах на різних кінцях молекули, так званих полюсів.

$$\vec{E} = \vec{E}(r, \vartheta), \quad \varphi = \varphi(r, \vartheta)$$

### Електричне поле диполя

Основні властивості електричного диполя полягають у тому, що він взаємодіє з електричним полем та іншими зарядами. Взаємодія електричного диполя з зовнішнім електричним полем проявляється у тому, що диполь спрямовується вздовж напрямку поля, тобто з орієнтації знаходження зарядів у диполі виникає момент сили. Інша властивість полягає в тому, що взаємодія електричного диполя з іншими зарядами проявляється в тому, що сила взаємодії між диполем і зарядом залежить від розташування заряду відносно диполя та орієнтації останнього.

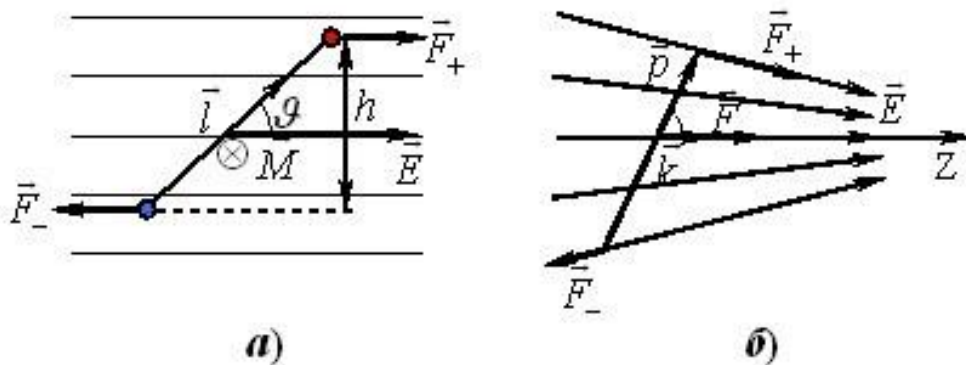


Рис. 2 Момент сил, що діють на диполь

$$M = F \times h$$

Електричний диполь може утворюватися в різних середовищах, включаючи вакуум, гази, рідини та тверді тіла. Наприклад, молекулярні диполі можуть утворюватися в молекулярних рідинних середовищах, таких як вода,

аміак та інші речовини. Електричні диполі також можуть утворюватися в кристалах, які складаються з взаємодіючих між собою атомів або молекул.

У рідких газах і твердих тілах електричний диполь може рухатися під дією зовнішнього електричного поля, що призводить до виникнення провідності в цьому середовищі. Крім того, електричні диполі можуть взаємодіяти один з одним, що призводить до утворення відповідних структур. Наприклад, домени у феромагнетиках або кластери в розчинах.

У твердих тілах, електричний диполь може бути утворений, наприклад, за рахунок різниці електричного потенціалу між атомами в кристалічній решітці. Електричні диполі також можуть виникати внаслідок взаємодії між дефектами кристалічної структури твердих тіл.

Поводження електричних диполів в середовищі під впливом різних джерел електричного поля дозволяє використовувати алгоритм визначення їх характеристик через використання сенсорів вимірювання індукції електричного поля для отримання багатьох фізичних явищ, таких як поляризація середовища і діелектричні властивості речовин, взаємодія електромагнітного поля з матеріалами. І багато іншого.

## **1.2 Огляд первинних вимірювальних перетворювачі (датчики, сенсори) напруженості електричного поля.**

Для вимірювання електричного поля можуть використовуватись різні сенсори, залежно від потрібної точності, діапазону вимірювання та типу поля, яке потрібно виміряти. Основні типи сенсорів для вимірювання електричного поля включають наступні:

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		8

- 1) Сенсори мікрофонного типу: ці сенсори використовуються для вимірювання змін напруги, що виникає через зміну відстані між електродами. Вони можуть вимірювати електричне поле в діапазоні від кількох мілівольт до кількох кіловольт на метр.
- 2) Сенсори зі зміщенням кільця: ці сенсори складаються з кільцевих електродів, розташованих один в середині іншого. Вони використовуються для вимірювання постійного та змінного електричного поля в діапазоні від декількох мікрівольт до декількох кіловольт на метр.
- 3) Сенсори крапельного типу: ці сенсори використовуються для вимірювання електричного поля в рідинних середовищах. Вони працюють на основі ефекту електричної поляризації крапель рідини, які розташовуються між електродами. Діапазон вимірювання може бути від кількох мікрівольт до кількох кіловольт на метр.
- 4) Сенсори з ізолюваною конструкцією: ці сенсори використовуються для вимірювання електричного поля в небезпечних умовах, наприклад, високій напрузі. Вони мають ізолювану конструкцію, що дозволяє їм працювати в умовах високої напруги без ризику пошкодження сенсора або людини. Діапазон вимірювання може бути від кількох мікрівольт до кількох кіловольт на метр.
- 5) Сенсори індуктивного типу: ці сенсори використовуються для вимірювання електричного поля високої частоти, наприклад, у радіочастотних системах. Вони працюють на основі індуктивної спроможності та можуть вимірювати електричне поле в діапазоні від кількох мікрівольт до кількох кіловольт на метр.
- 6) Сенсори з польовим транзистором: ці сенсори використовуються для вимірювання електричного поля у відкритому просторі та можуть вимірювати електричне поле в діапазоні від кількох мікрівольт до декількох кіловольт на метр.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		9

Залежно від діапазону вимірювання та типу поля, яке потрібно виміряти, можуть використовуватись інші типи сенсорів. Наприклад, для вимірювання електричного поля високої частоти можуть використовуватись діоди Шотткі, а для вимірювання постійного електричного поля в повітрі можна використовувати електрометри.

### 1.2.1 Електричні сенсори від компанії Ultra Electronics.

Одним із виробників електричних сенсорів для вимірювання електричного поля на підводних об'єктах виступає компанія Ultra Electronics. Сенсори електричного поля від Ultra Electronics на основі хлориду срібла використовуються для вимірювання електричних полів у морській воді з високою точністю. Для цього в технології використовуються спеціально розроблені чутливі елементи зі срібла та хлориду срібла.

#### Технічні характеристики сенсора:

Тип сенсора - Ag/AgCl

Пакет - циліндричний, матеріал поліацеталь

Загальна довжина за винятком пенетратора - 165ммз

Довжина кабелю - 1,3м

Діаметр с кришкою - 70мм

Робоча глибина - 4000м

Загальна маса - 700г

Електричний інтерфейс - Impulse VMF-1-fS

Діапазон робочих температур - від 0° до +50°С

Температурний діапазон зберігання - від 0° до +70°С

#### Загальна продуктивність системи:

Канали вимірювання - 3

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Джерело живлення -  $V_s = \pm 8V \pm 1V DC$   
Споживання енергії -  $< 5Вт$   
Час увімкнення -  $< 10хв$   
Динамічний вхідний діапазон -  $+2,5мВ$   
Пропускна здатність - DC до 3кГц (-3дБ)  
Скорочення відкату - 6дБ/октава (20дБ/декада)  
В смізі хвилі -  $< \pm 3дБ$   
Розмах вихідної напруги -  $+5В$  мін  
Допуск масштабного коефіцієнта - 1,0%  
Тип виведення - аналогова напруга  
Еквівалентний вихідний шум на 1Гц -  $< 0,52нВ$

Технічні характеристики підсилювача:

Напруга живлення -  $+8В$   
Струм живлення - 75мА  
Gain - 2000  
Gain tolerance - 1%  
Розмах вихідної напруги -  $+5В$  мін  
Вхідний динамічний діапазон  $+2,5 мВ$   
Пропускна здатність DC - до 3кГц (-3дБ)  
Тип виведення - аналогова напруга  
Вхідний шум - 0,44нВ Гц при 1Гц

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис. 3 Сенсори компанії Ultra Electronics.

### 1.2.2 Електричні сенсори від компанії Polyamp.

Для вимірювання електричного поля компанія Polyamp виробляє свої сенсори на основі карбону. А також свої підсилювачі, наприклад, розглянемо і порівняємо підсилювач RA3004 з сенсорами.

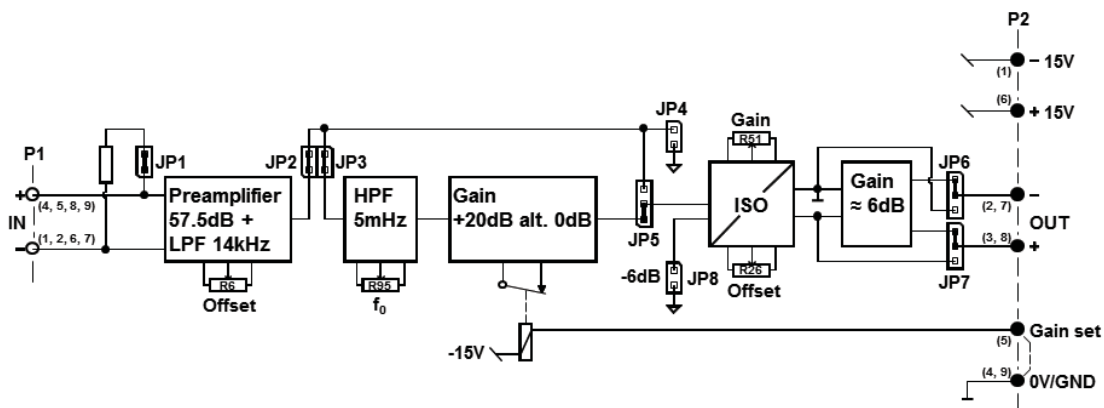


Рис. 4 Структурна схема підсилювача RA3004

- JP1 - вхід сенсора, по одному сенсору на полюс
- JP1 - перемикач типу сенсора. Зніміть перемичку для електродів типу AgAgCL
- JP2 - завжди увімкнений
- JP3 - сигнал на ФВЧ і підсилювач +20 дБ
- JP4 - прямий вихід підсилювача постійного струму до 14 кГц, JP3 відключений
- JP5 - селектор сигналу на підсилювач ізоляції
- JP6/JP7 - шунтування лінійного підсилювача
- JP8 - компенсація 6 дБ лінійного драйвера дає підсилення 60/80 дБ
- Коефіцієнт підсилення встановлюється від +20 дБ до 0 дБ шляхом заземлення на нуль

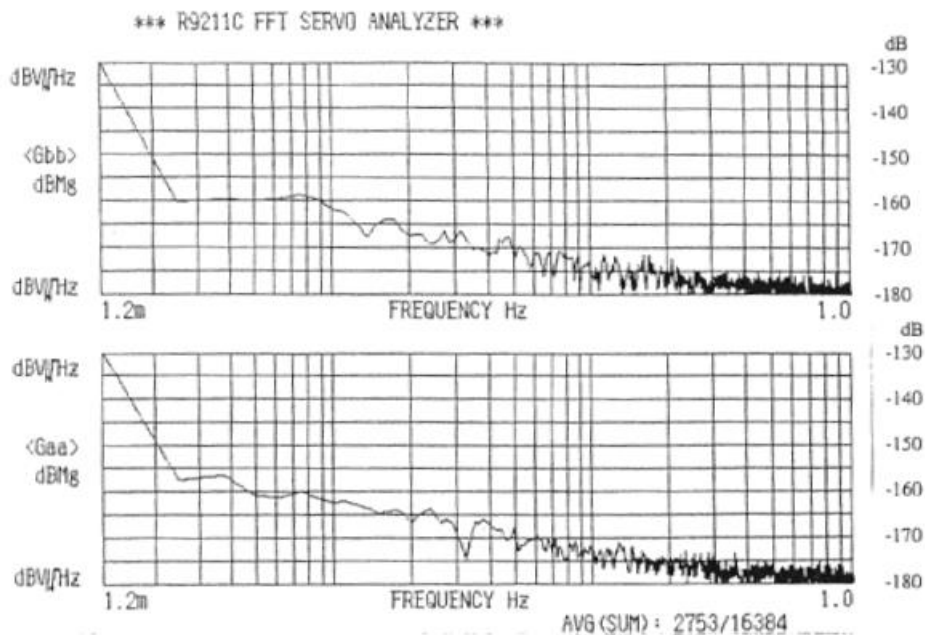


Рис. 5 Вихідна характеристика сигналу

Обидва графіки шуму виміряні з 10 Ом на вході з імітацією 2700-метрового морського кабелю з використанням збалансованого лінійного динаміка РА3004 на обох кінцях. Вище 1 Гц рівень шуму становить -180 дБ або  $1,0 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$  від 1 до 10 кГц.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рис. 6 Сенсор PA3001



Рис. 7 Сенсор PA3001B

Сенсор з карбону дуже чутливий і його шум нижчий, ніж у підсилювача PA3004 (див. діаграму нижче). У диференціальному режимі низькоомних вимірювань характеристика сенсора є ємнісною, що означає, що буде виникати віртуальна постійна напруга. З цієї причини підсилювач оснащений фільтром високих частот (5 мГц) для забезпечення стабільного нульового рівня. Цей фільтр також захищає від насичення підсилювача через шум постійного струму, який є найпоширенішою причиною насичення цього типу високочутливих підсилювачів. Тому цей НР-фільтр також особливо актуальний для систем AgAgCl.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						14
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

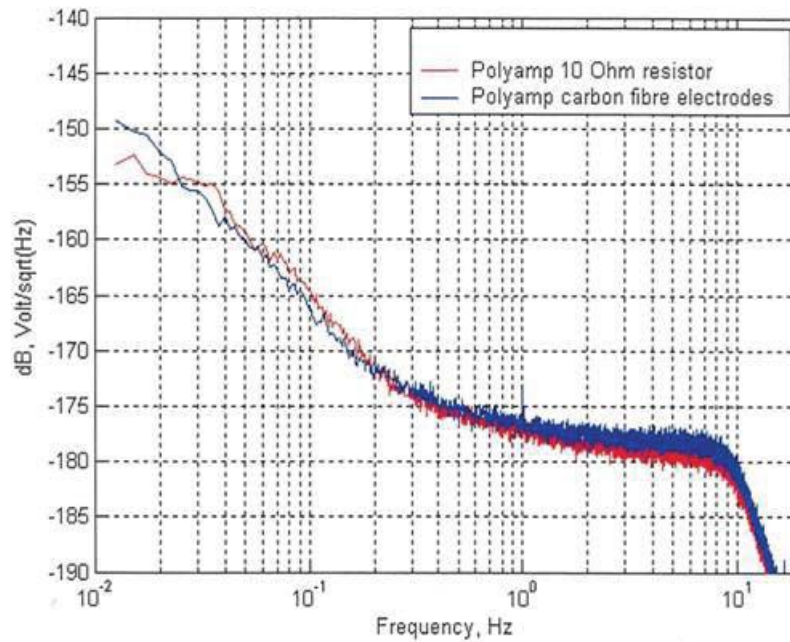


Рис. 8 Шум карбонового сенсора в порівнянні з підсилювачем

На графіку показано шумові характеристики входів підсилювача з резистором 10 Ом (червоний) і підключених до карбонових сенсорів (синій) в діапазоні частот від 0,01 Гц до 10 Гц. Це свідчить про те, що вуглецеві сенсори працюють в межах шуму підсилювача. Вимірювалось це за допомогою підсилювача PA3002 з фільтром LP на частоті 10 Гц.

Модель	PA3001	PA3001B
Висота	125 ±5мм	58мм
Діаметр	50мм	55мм
Вага	150г	130г
Довжина кабелю	1м	1м

#### Екологічні характеристики сенсора

Глибина, стандарт	300м
-------------------	------

Глибина, необов'язкова	3000м
Робоча температура	від -5 до +55°C
Температура зберігання	
Волого	від +1 до +55°C
Сухо	від -40 до +55°C
Захист від потоку	PP Felt
Захист від зростання / бур'янів	PP Felt

### 1.3 Види джерел електричного поля.

Електричне поле можна вимірювати за допомогою різних типів сенсорів, про які я вже згадував в попередній відповіді. Зазвичай сенсори розташовуються в місці, де потрібно вимірювати електричне поле, тобто в точці, де можливо виникнення електричного поля.

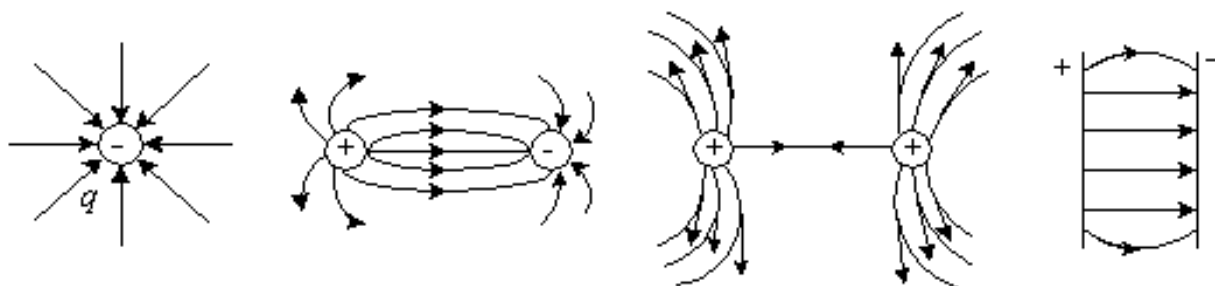


Рис. 9 Електричне поле різних заряджених тіл

Силкові лінії електричного поля точкових зарядів незамкнені. Вони починаються на позитивних електричних зарядах і закінчуються на негативних. Віддалік від країв пластин силкові лінії паралельні: електричне поле однакове у

всіх точках. Електричне поле, напруженість якого однакова у всіх точках простору, називають однорідним.

Якщо на електричний заряд  $q$  діють одночасно електричні поля декількох зарядів, то результуюча сила дорівнює геометричній сумі сил, що діють з боку кожного поля окремо. Ця властивість електричних полів означає, що ці поля підлягають принципу суперпозиції: якщо в заданій точці простору різні заряджені частинки створюють електричні поля напруженістю:

$$\sigma = \frac{q}{S}, E = \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon S} + \frac{q}{2\varepsilon\varepsilon_0 S} = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S}, \vec{E}$$

то результуюча напруженість поля в цій точці дорівнює геометричній сумі напруженостей полів частинок:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$$

Завдяки принципу суперпозиції для знаходження напруженості поля системи заряджених частинок у будь-якій точці  $A$  досить знати вираз для напруженості поля точкового зарядженого тіла і додати вектори за правилом паралелограма:

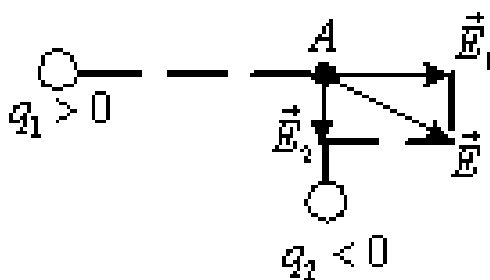


Рис. 10

Принцип суперпозиції (накладання) полів означає, що електричні поля під час накладання не впливають одне на одне.

Принцип суперпозиції дозволяє обчислити напруженість поля довільної системи зарядів, а не тільки точкових, зокрема і рівномірно зарядженої площини.

За рівномірного розподілу електричного заряду  $q$  по поверхні площею  $S$  поверхнева густина заряду  $\sigma$  є сталою і дорівнює:

$$\sigma = \frac{q}{S}$$

Напруженість електричного поля нескінченної площини з поверхневою густиною заряду  $\sigma$  однакова в довільній точці простору і дорівнює:

$$\frac{F}{q_0} = k \frac{q}{\epsilon r^2}$$

де  $\epsilon_0$ - електрична стала

### 1.3.1 Вимірювання та розташування сенсорів.

Сенсори з польовим транзистором можуть бути розташовані в просторі на певній відстані один від одного, а їх висота над поверхнею залежить від того, наскільки точно потрібно виміряти електричне поле. При цьому необхідно забезпечити, щоб сенсори не взаємодіяли між собою та не впливали на об'єкт вимірювання.

Сенсори з мікрохвильовою резонансною коливальною лінією можуть бути розташовані на певній відстані від поверхні об'єкта, на якому потрібно виміряти електричне поле. Вони можуть бути встановлені на спеціальних підставках або утримувачах, що забезпечують стійкість і точність позиціонування сенсорів.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		18

Окрім того, для забезпечення стійкості та точності вимірювання необхідно враховувати вплив зовнішніх електромагнітних поля на сенсори. Тому вимірювальні сенсори можуть бути захищені від зовнішніх електромагнітних впливів, а також забезпечені екрануванням та фільтрацією сигналу.

Інші типи сенсорів для вимірювання електричного поля можуть бути оснащені додатковими пристроями для позиціонування. Наприклад, вимірювальний сенсор може бути встановлений на робочому механізмі, що дозволяє йому переміщуватись у трьох вимірах для забезпечення точного вимірювання електричного поля від різних джерел.

Також можуть бути використані мережеві аналізатори для вимірювання електричного поля, які мають більш широкий діапазон вимірювання та можуть використовуватись для аналізу різних параметрів електричного поля, таких як амплітуда, частота та фаза.

Щодо розташування сенсорів, то воно залежить від конкретної задачі вимірювання. Наприклад, для вимірювання електричного поля в точці, яка знаходиться поблизу джерела електричного поля, можуть використовуватись сенсори, розташовані уздовж вісі симетрії джерела. Для вимірювання електричного поля в магнітному полі можуть використовуватись сенсори, що знаходяться в різних точках в просторі, забезпечуючи тим самим можливість визначення напрямку та інтенсивності електричного поля.

У кожному випадку розташування сенсорів для вимірювання електричного поля повинно бути обґрунтовано та забезпечувати точність вимірювання та унеможливити вплив на об'єкт вимірювання.

Зазвичай для вимірювання електричного поля використовують різноманітні сенсори, які базуються на різних принципах роботи. Один з найпоширеніших типів сенсорів - це електрометри, які здатні вимірювати потенціал електричного поля в точці в просторі. Електрометри мають низький

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19



## Візуалізація роботи іонної камери

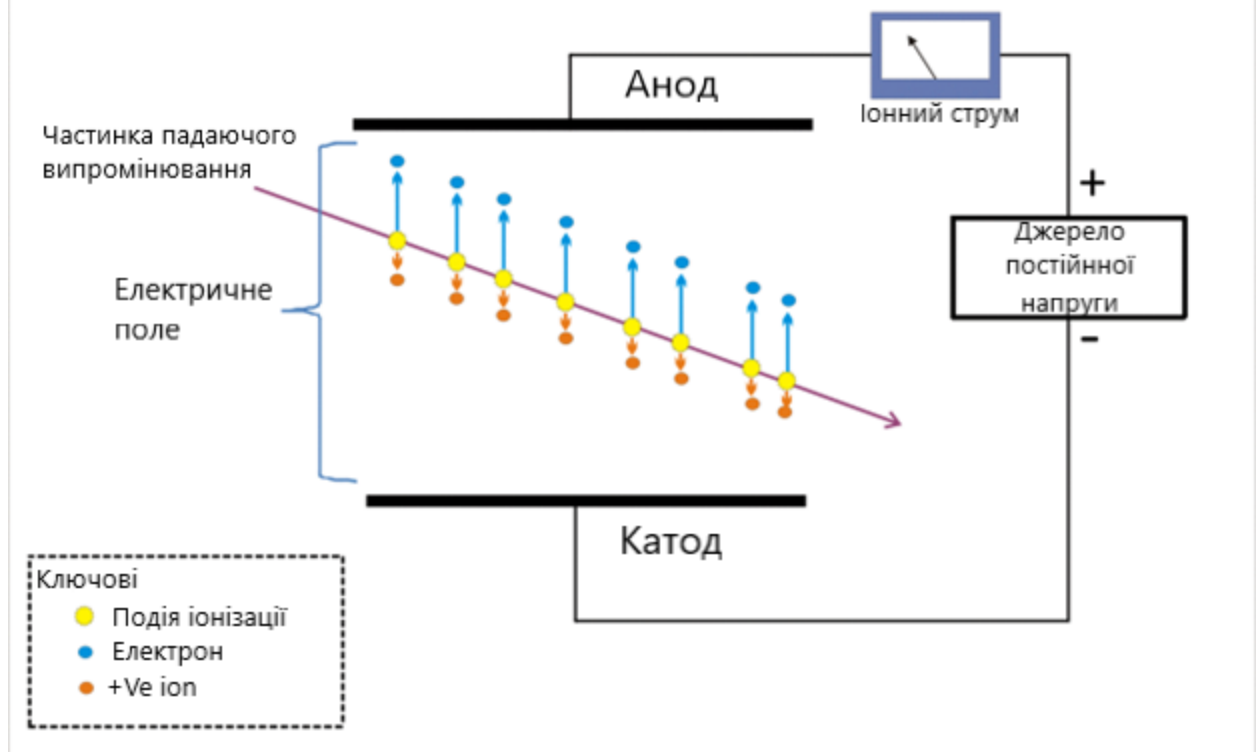


Рис. 12 Візуалізація роботи іонної камери

Інші типи сенсорів включають кремнієві діоди, оптичні сенсори, мікрофони та інші. Для вимірювання електричного поля можуть також використовуватись термінові пари, які змінюють свою опірність при дії електричного поля.

Розташування сенсорів для вимірювання електричного поля залежить від конкретної задачі вимірювання. Для точного вимірювання електричного поля в конкретній точці в просторі, сенсор повинен бути розташований найближче можливо до цієї точки. Якщо вимірювання потрібно проводити в більшій області, то може використовуватись мережа з декількох сенсорів, розташованих в різних точках.

Для розміщення сенсорів вимірювання електричного поля використовують різноманітні методи. Одним з них є метод розташування сенсорів на фіксованих точках. У цьому випадку сенсори розташовуються на заздалегідь визначених точках, що дозволяє проводити вимірювання в цих

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

точках з високою точністю. Такий метод може бути використаний, наприклад, при вимірюванні електричного поля на великих відкритих майданчиках або у зоні впливу електричних ліній електропередач.

Іншим методом є метод рухомих сенсорів, при якому сенсори розташовуються на мобільних платформах, які рухаються вздовж зони вимірювання. Цей метод дозволяє проводити вимірювання електричного поля в режимі реального часу та отримувати даних з великої кількості точок в просторі.

Інший метод - це метод використання сенсорів, вбудованих у спеціальні прилади. Наприклад, для вимірювання електричного поля в лабораторних умовах можна використовувати спеціальні прилади, такі як електростатичні вимірювальні прилади, що містять вбудовані сенсори.

Крім того, для вимірювання електричного поля можуть використовуватись такі методи, як метод радіоінтерферометрії та метод акустоелектричних ефектів. Вони дозволяють проводити вимірювання електричного поля без прямого контакту з ним та дозволяють вимірювати поля в досить великих відстанях від джерела.

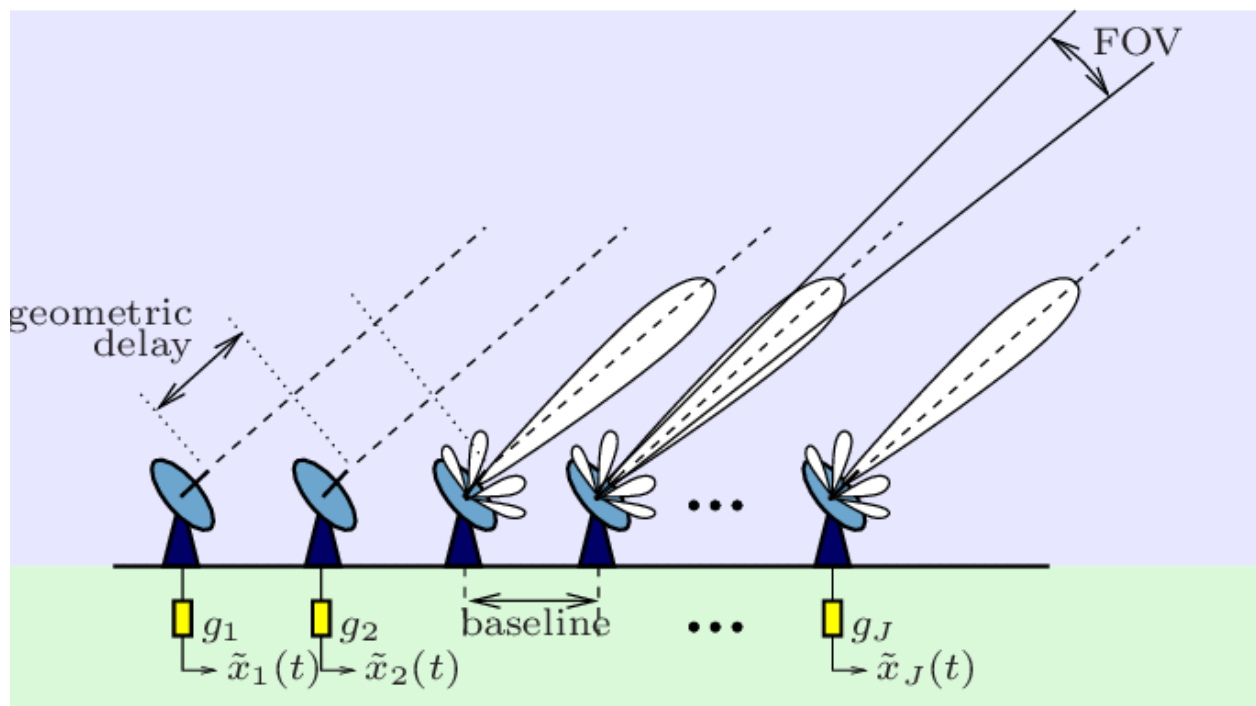


Рис. 13 Метод для визначення координат джерела електричного поля (метод радіоінтерферометрії )

Залежно від конкретної задачі вимірювання, може бути вибрано один або декілька методів вимірювання, а також відповідний спосіб розміщення сенсорів. Наприклад, якщо необхідно виміряти електричне поле вздовж ділянки дороги, можна використовувати мобільні сенсори, розташовані на автомобілі. Якщо ж необхідно виміряти електричне поле в точці, наприклад, в зоні дії антени, можна використовувати фіксовані сенсори, розташовані на заздалегідь визначених точках.

Також важливо враховувати особливості самого сенсора. Наприклад, найбільш поширеними типами сенсорів для вимірювання електричного поля є індукційні та електростатичні сенсори. Індукційні сенсори вимірюють зміну магнітного поля, що виникає внаслідок зміни електричного поля, тоді як електростатичні сенсори вимірюють зміну напруги між електродами, які розташовані в електричному полі. Враховуючи ці особливості сенсорів, можна підібрати найбільш підходящий сенсор для конкретної задачі вимірювання електричного поля.

### Висновок до розділу 1

Електричний диполь є моделлю, що описує взаємодію заряджених частинок у просторі. Він складається з двох зарядів різної полярності, розділених на відстань. Електричний диполь може реагувати на зовнішнє електричне поле та впливати на навколишні заряджені частинки, що дозволяє вимірювати та аналізувати параметри поля за допомогою диполя. Були розглянуті різні сенсори, їх розташування та різні методи вимірювання джерел електричного поля.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23





перебувають під напругою вимірювання пристроїв під напругою у частотному діапазоні, що нас цікавить.

Ці схеми працюють від 5 В і мають діапазон вихідної напруги до 60 mV. Щоб використати отриманні значення з цих датчиків на АЦП потрібен вторинний вимірювальний перетворювач типу підсилювача. Доступними на ринку підсилювачами є мікросхеми компанії Analog Devices. Для опрацювання сигналів з сенсорів потрібен диференційний вхід тому вторинним вимірювальним перетворювачем повинен бути інструментальний підсилювач. Для цього можна використати мікросхему AD8422. Особливостями цієї мікросхеми є:

- Низьке енергоспоживання: 330 мкА максимальний струм спокою.
- Вихід "рейка на рейку.
- Низький рівень шуму і спотворень.
- 8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$  максимальний шум вхідної напруги при 1 кГц0.
- 15 мкВ р-р RTI шум ( $G = 100$ ).
- 0,5 ppm нелінійність з навантаженням 2 кОм ( $G = 1$ ).
- Відмінні характеристики змінного струму.
- Мінімальний коефіцієнт гармонік 80 дБ на частоті 7 кГц ( $G=1$ ).
- Смуга пропускання 2,2 МГц ( $G = 1$ ).
- Високоточні характеристики постійного струму (AD8422BRZ).
- 150 дБ мінімальний CMRR ( $G = 1000$ ).
- 0,04% максимальна похибка посилення ( $G = 1000$ ).
- 0,3 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$  максимальний дрейф напруги вхідного зсуву.
- 0,5 нА максимальний вхідний струм зсуву.
- Широкий діапазон живлення.
- від 3,6 В до 36 В одиночне живлення.
- Від  $\pm 1,8$  В до  $\pm 18$  В подвійне живлення.
- Захист від перенапруги на вході: 40 В.
- Діапазон підсилення: від 1 до 1000.

Для цифрового перетворення використовується АЦП або аналогово-цифровий перетворювач. Він є частиною мікроконтролера (МК). Наразі в Україні є досить поширене використання мікросхем компанії ST Microelectronics серії STM32F207XX. Особливостями серії цих МК є:

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26



Кінцевим завданням цього приладу є надання даних персональному комп'ютеру (ПК). Для цього використовується інтерфейс ПК RS-232. Він не підтримується мікроконтролерами, тому буде використана мікросхема перетворення інтерфейсів. Зі сторони мікроконтролера використано інтерфейс USART. Для цього можна використати мікросхему MAX232 компанії MAXIM. Її особливостями є живлення від +3,0 В до +5,5 В, швидкість до 1 Мбіт/с.

#### Висновок до розділу 2

В даному розділі обрано та обґрунтовано основні елементи автоматизованої системи вимірювання характеристик магнітного поля рухомого об'єкту. На обрані елементи були наведені та обґрунтовані існуючі мікросхеми різних компаній. Такими мікросхемами є сенсори електричного поля компанії Polyamp серії PA3001, інструментальні підсилювачі компанії Analog Devices, мікросхема компанії ST Microelectronics серії STM32F207XX та петворювач інтерфейсний компанії MAXIM MAX232.

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Розроблення структурної схеми автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля здійснюється з урахуванням функцій та взаємозв'язків компонентів. На рисунку 14 зображена структурна схема системи.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

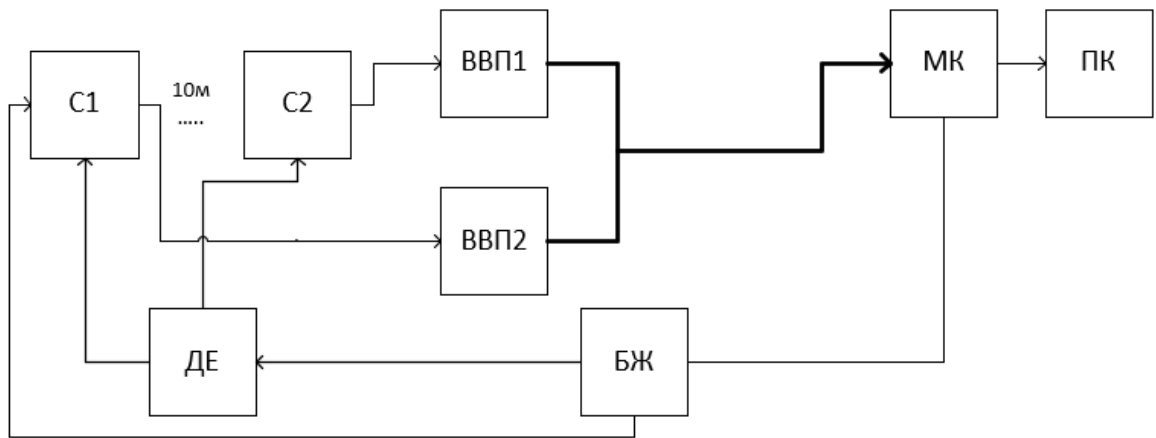


Рис. 14 - Схема електрична структурна автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля

На структурній схемі зображено основні компоненти системи виявлення вибухонебезпечних речовин.

На структурній схемі позначені наступні елементи:

1. ДЕ - джерело електричного поля.
2. С1, С2 - сенсори вимірювання джерел збудження електричного поля: Сенсори вимірюють електричне поле у заданих місцях. Вони можуть бути розташовані вздовж периметру контрольної зони або в стратегічних місцях, щоб виявляти потенційні джерела збудження.
3. ВВП1, ВВП2 – вторинні вимірювальні перетворювачі.
4. МК - мікроконтролер: Це основний керуючий блок системи. Мікроконтролер отримує дані від сенсорів, обробляє їх і приймає рішення на основі заданої логіки або алгоритму.
5. ПК - персональний комп'ютер: Комп'ютер є зовнішнім пристроєм, з якого можна отримати доступ до даних, збережених у системі. Він підключається до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу, наприклад, USB, і забезпечує передачу даних для подальшої обробки або відображення.

6. БЖ - блок живлення, як блок структурної схеми, відображає компонент, відповідальний за постачання електричної енергії для різних елементів системи.

Ця структурна схема відображає основні компоненти та їх взаємозв'язки в системі контролю джерел збудження електричного поля. Вона служить основою для розробки подальших етапів дипломної роботи.

### Висновок до розділу 3

Розроблена структурна схема для автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля. Схема включає основні компоненти, такі як джерело електричного поля, сенсори вимірювання джерел збудження електричного поля, вторинні вимірювальні перетворювачі, мікроконтролер, персональний комп'ютер та блок живлення. Взаємозв'язок компонентів відображений зліва на право, що дозволяє зрозуміти послідовність передачі даних та керування в системі.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІЙНОЇ СХЕМИ

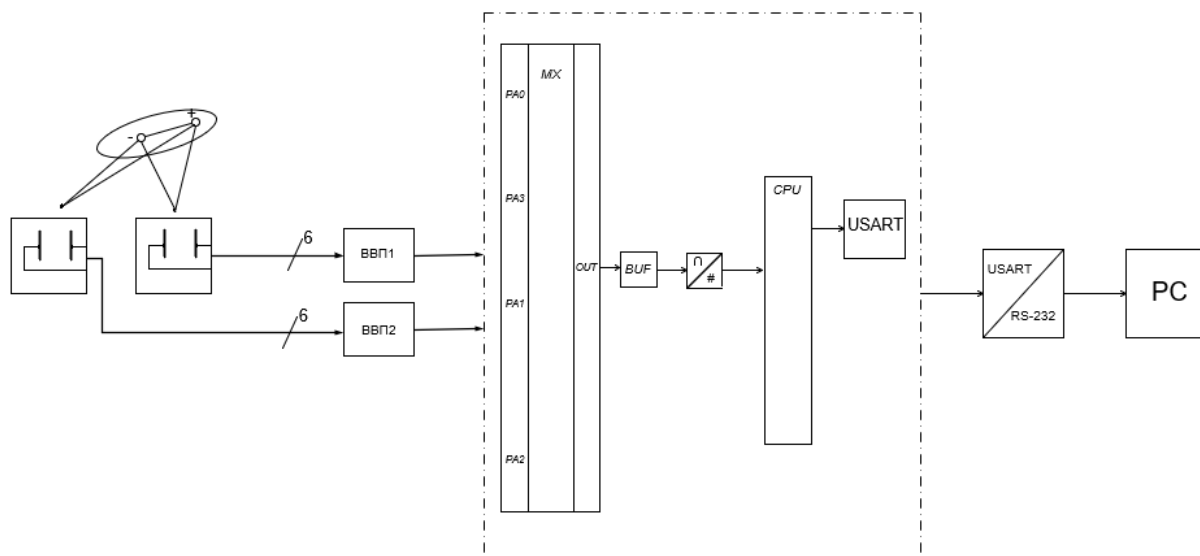


Рис. 15 Схема електрична функційна автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля

Електричне поле діє на сенсори які складаються з двох пластин, на одному сенсорі заряд зберігається одного значення, на іншому сенсорі другого значення, ця різниця зарядів створює різницю електричного поля. Через диференційний підсилювач їх підсилюємо і різницева напруга поступає на вторинний вимірювальний перетворювач у вигляді підсилювача.

У проекті буде використаний вторинний вимірювальний перетворювач. Його завданням буде підсилувати отримані дані від сенсорів і передавати їх мікроконтролеру для подальшої обробки.

Використання інструментального підсилювача дозволить збільшити амплітуду сигналів від сенсорів, що поліпшить їхню якість та стабільність. Підсилені дані будуть передаватись з підсилювача до мікроконтролера через мультиплексор.

Мікроконтролер виконуватиме ключову роль у процесі отримання та обробки даних. Завдяки вбудованому аналого-цифровому перетворювачу (АЦП), мікроконтролер здатний перетворювати аналогові значення електричного поля на цифровий формат, який можна обробляти та аналізувати.

Після конвертації та обробки даних в мікроконтролері, результати будуть передаватись до персонального комп'ютера. Для забезпечення комунікації між мікроконтролером та комп'ютером, використовуватимуться відповідні інтерфейси.

Мікроконтролер буде використовуватися, USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter) для передачі даних. USART є інтерфейсом передачі даних, який забезпечує зв'язок між мікроконтролерами або мікропроцесорами та зовнішніми пристроями, такими як датчики, дисплеї, модеми тощо. У вашому проекті USART буде працювати в асинхронному режимі, де дані передаються без синхронізації за допомогою окремої лінії годинника.

Для забезпечення комунікації з персональним комп'ютером буде використаний RS-232 інтерфейс. RS-232 (Recommended Standard 232) є стандартним протоколом для передачі послідовних сигналів даних між

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		31

пристроями через послідовний порт. Він був спеціально розроблений для забезпечення з'єднання комп'ютерів з різними зовнішніми пристроями, включаючи модеми, принтери, сенсори, аудіо- та відеообладнання.

RS-232 використовує асинхронний метод передачі даних, де біти передаються послідовно, один за одним, без сигналу годинника. Зазвичай для комунікації використовуються дві лінії: TX (Transmit - передача) для відправлення даних з передавача та RX (Receive - прийом) для отримання даних на приймачі.

Для забезпечення сумісності та перетворення рівнів сигналів між USART мікроконтролера та RS-232 інтерфейсом персонального комп'ютера використовується мікросхема MAX232. MAX232 є інтегральною мікросхемою, яка забезпечує перетворення рівнів сигналів з RS-232 на рівні сигналів логіки TTL (Transistor-Transistor Logic) та навпаки.

Принцип дії MAX232 базується на використанні внутрішніх зарядних pomp, які генерують додаткові напруги, необхідні для RS-232 комунікації. Мікросхема містить чотири лінійні ступені зарядних pomp, два драйвери для передавача (TX) та два драйвери для приймача (RX). Під час роботи мікросхеми, спочатку генеруються негативна напруга (-V) та позитивна напруга (+V), які необхідні для RS-232 сигналів. Потім, RS-232 сигнали вводяться в вхідні вузли мікросхеми, а драйвери передавача перетворюють логічні рівні сигналів TTL на RS-232 сигнали, які можуть бути передані на підключений RS-232 пристрій. Зворотнім перетворенням займаються драйвери приймача, які перетворюють RS-232 сигнали на рівні сигналів TTL, зрозумілі для мікроконтролера або мікропроцесора.

Застосування мікросхеми MAX232 дозволяє забезпечити двосторонню комунікацію між мікроконтролером або мікропроцесором та RS-232 пристроями. Це означає, що дані можуть передаватися в обидва напрямки - від мікроконтролера до комп'ютера та навпаки.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		32

## Висновок до розділу 4

В даному розділі описана функційна схема автоматизованої системи контролю збудження джерел електричного поля. Щоб опрацювати отримані потенціали потрібні інструментальні підсилювачі. А для зв'язку з периферією потрібні інтерфейси USART та RS-232.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

Для розроблення структурної схеми обираємо сенсори вимірювання джерел електричного поля від компанії Polyamp PA3001. Щоб використати отриманні значення з цих сенсорів на АЦП потрібен вторинний вимірювальний перетворювач типу підсилювача. Доступними на ринку підсилювачами є мікросхеми компанії Analog Devices. Для опрацювання сигналів з сенсорів потрібен диференційний вхід тому вторинним вимірювальним перетворювачем повинен бути інструментальний підсилювач. Для цього можна використати мікросхему AD8422. Принципова схема показана на рисунку 16:

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		33

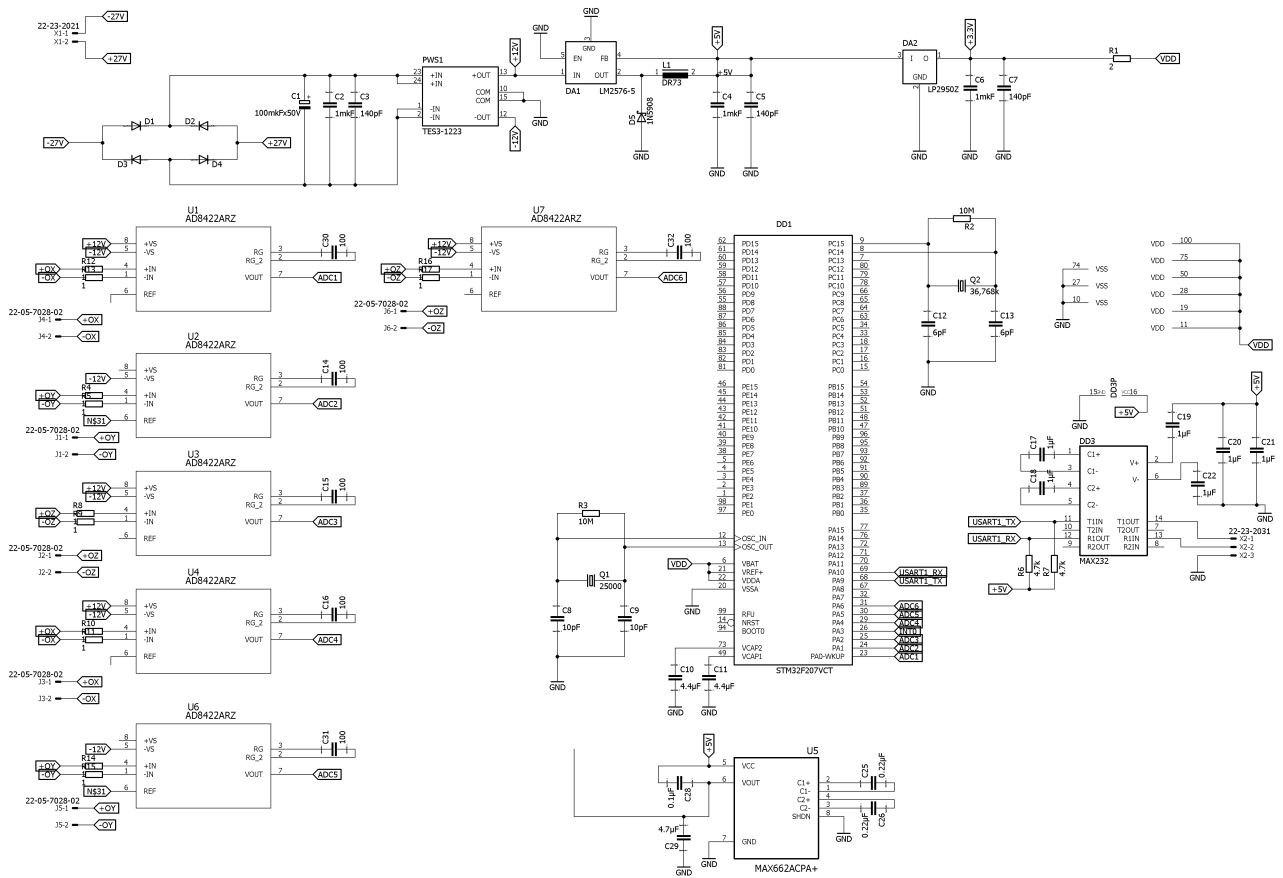


Рис. 16 Схема електрична принципова автоматизованої системи контролю джерел збудження електричного поля

Використовуючи попередньо створені схеми, розроблення принципової схеми була розділена на декілька блоків, що включають основні мікросхеми і супутні елементи.

Для роботи приладу розроблено блок живлення.

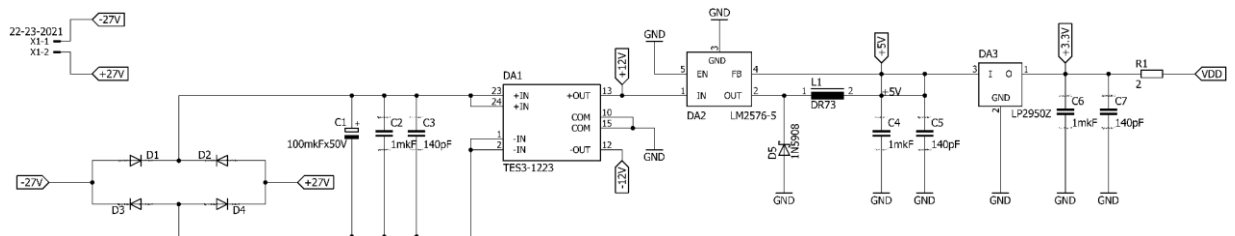


Рис. 17 Блок живлення

При розробці принципової схеми використовується зовнішнє джерело живлення, яке підключається до приладу через роз'єм моделі MOLEX 22-23-

2021. На схемі зображена змінна напруга 27 В, але для зручності створено дві постійні напруги: +27 В та -27 В, за допомогою діодного мосту складеного з чотирьох діодів моделі DIODE-DO214AC.

Для стабілізації живлення використовується поляризований конденсатор моделі CPOLEU140CLH-1010 (CPOLEU) ємністю 100 мкF та напругою 50 В, а також два конденсатори моделей CC0603 (C) ємністю 1 мкF та 140 пF. Після цього отримана напруга перетворюється на +12 В та -12 В за допомогою перетворювача струму TES3-1223 від компанії Traco Power. Отримані напруги використовуються для живлення інструментальних підсилювачів.

З напруги +12 В отримується також напруга +5 В за допомогою мікросхеми LM2576-5.0, яка є 3.0 А, 5 В, понижуючим імпульсним регулятором. Серія регуляторів LM2576 має хороше регулювання лінії та навантаження, і доступні моделі з фіксованою вихідною напругою 3,3 В, 5,0 В, 12 В, 15 В, а також з регульованою вихідною напругою. Для стабілізації отриманої напруги +5 В також використовуються два конденсатори моделей CC0603 (C) ємністю 1 мкF та 140 пF.

Для захисту наступних менш потужних схем використовується котушка індуктивності моделі DR73 та діод 1N5908. Для живлення мікроконтролера створюється напруга +3,3 В за допомогою компонента LP2950Z (LP2950) з характеристиками 100 мА та 30 В. LP2950Z є мікросхемою стабілізатора напруги з низьким випадковим вихідним шумом, яка забезпечує стабільний вихідний струм та напругу на виході блоку живлення, необхідну для нормальної роботи електронних пристроїв. Вона має високу точність вихідної напруги та може працювати в широкому діапазоні вхідних напруг.

Отриману напругу +3,3 В додатково стабілізують два конденсатори моделей CC0603 (C) ємністю 1 мкF та 140 пF. Також для мінімізації впливу імпульсів мікроконтролера на інші мікросхеми, отриману напругу +3,3 В ізолюють резистором моделі R-EU\_R0603 (R-EU) з опором 2 Ом.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		35

Таким чином, в розробленій принциповій схемі використовуються різні блоки та компоненти, які забезпечують стабільне та оптимальне живлення різних частин пристрою.

Додатково до вищезазначеного, важливо зазначити, що використання різних елементів та компонентів в схемі дозволяє забезпечити необхідні напруги для живлення різноманітних модулів та пристроїв у системі.

Крім того, в схемі також використовуються діоди, котушки індуктивності та захисний діод для забезпечення надійності та захисту від перенапруги чи короткого замикання. Ці компоненти грають важливу роль у забезпеченні стабільності та захисту всієї системи від потенційних несправностей або пошкоджень.

Усі вищенаведені елементи і компоненти були обрані з урахуванням вимог проекту та потреб системи. Вони взаємодіють між собою для забезпечення надійного та стабільного живлення всіх необхідних компонентів і пристроїв в системі.

В цілому, поділ схеми на блоки та використання попередньо створених елементів та компонентів допомагає спростити розробку принципової схеми та забезпечити оптимальне та надійне живлення всієї системи.

Коли сенсори реєструють електричне поле, результатом є поява двох напруг з протилежними полярностями. Для перетворення цих напруг на потенціал і підвищення його до відповідного діапазону для подальшої обробки мікроконтролером, використовуються інструментальні підсилювачі AD8422. Їх живлення забезпечується напругами +12 В та -12 В, а коефіцієнт підсилення становить 50.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		36



100 ніжками. Для забезпечення його працездатності, підключено ізольоване живлення +3,3 В, а також землю через два конденсатори моделі CC0603 (C) ємністю 4,4  $\mu\text{F}$ . Крім того, підключено два кристали моделі CRYSTAL HC49S (CRYSTAL) з частотами 25000 і 36768 кГц. Кожен кристал підключений до мікроконтролера через резистор моделі R-EU\_R0603 (R-EU\_) з резистивністю 10 МОм і два конденсатори моделі CC0603 (C) ємністю 10 pF і 6 pF відповідно. Для цього використовуються такі піни: для живлення +3,3 В: 6 (VBAT), 11, 19, 20 (VDDA), 21 (VREF+), 28, 50, 75, 100; для землі (GND): 10, 27, 49 (VCAP1 з конденсатором 4,4  $\mu\text{F}$ ), 73 (VCAP2 з конденсатором 4,4  $\mu\text{F}$ ), 74; для підключення кристала з частотою 25000: 12 (OSC\_IN), 13 (OSC\_OUT); для підключення кристала з частотою 36768 кГц: 8 (PC14), 9 (PC15).

Мікроконтролер використовує піни 23 (PA0 - WKUP), 24 (PA1) і 25 (PA2) для вводу аналогових сигналів, які відповідають ADC123\_IN0/WKUP, ADC123\_IN1, ADC123\_IN2, ADC123\_IN3, ADC123\_IN4, ADC123\_IN5 і відповідно ADC123\_IN6. Пін 26 (PA3) використовується для створення імпульсу, який скидає датчики. Для передачі обробленої інформації через інтерфейс використовуються піни 68 (PA9), який підтримує USART1\_TX, та 69 (PA10), який підтримує USART1\_RX.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		38

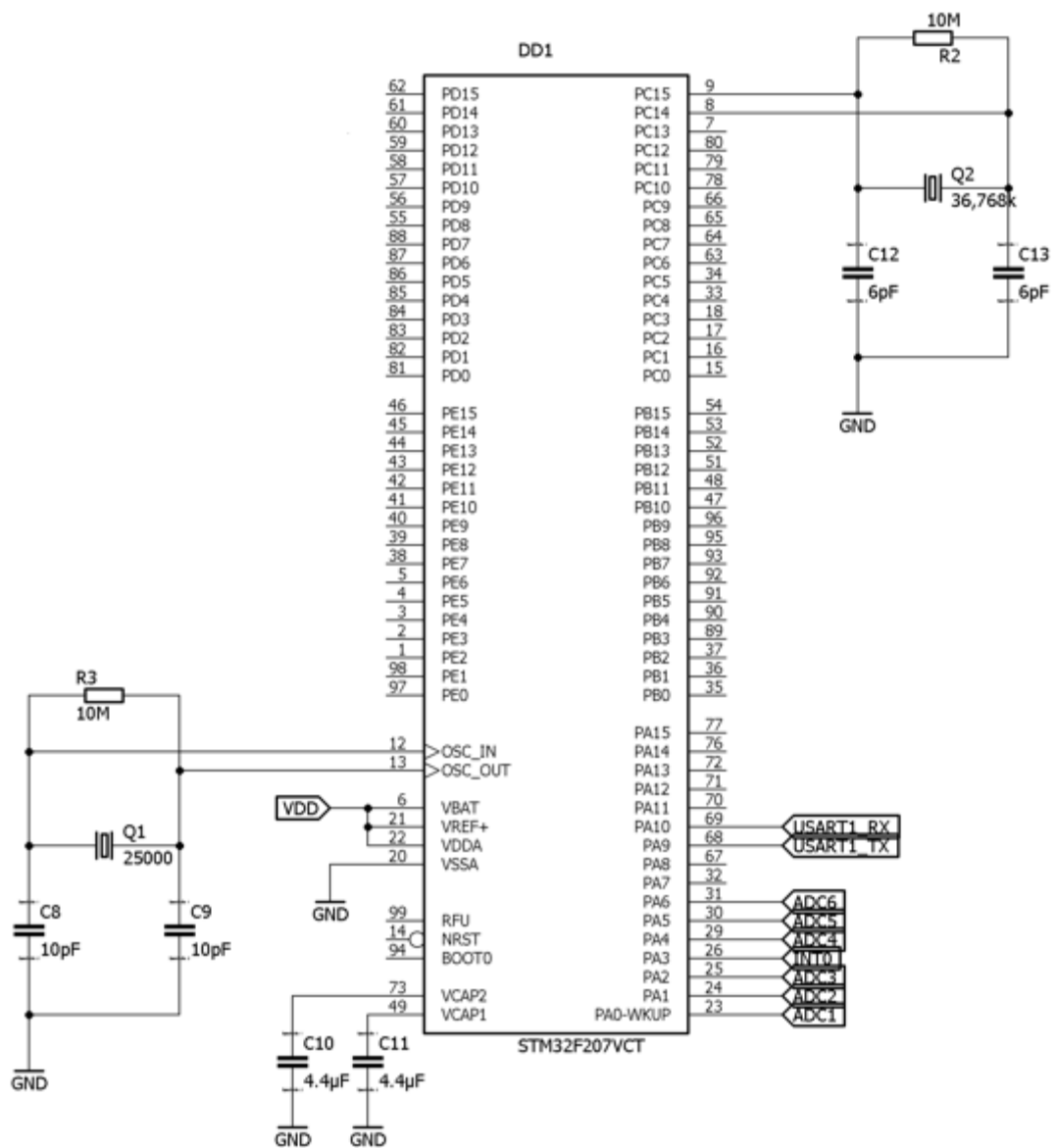


Рис. 18 Базові елементи мікроконтролер STM32F207VCT

Інтерфейс USART підключений до мікросхеми MAX232, яка виконує функцію перетворення на інтерфейс RS-232. Для живлення використано +5 В. Для підключення живлення, землі та налаштування мікросхеми використані конденсатори ємністю 1 μF моделі CC060 (C) і резистори з опором 4.7 кОм моделі R-EU\_R0603 (R-EU\_). MAX232 є інтегральною мікросхемою, що використовується для зміни рівнів логічних сигналів, що використовуються в комп'ютерах та електронних пристроях, на сигнали з високим рівнем напруги, необхідні для передачі даних по дротових лініях зв'язку. Для зв'язку з комп'ютером за допомогою MAX232 потрібно підключити входні лінії мікросхеми до вихідних ліній порту RS-232 комп'ютера (наприклад, COM-

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

порту). На виходах мікросхеми будуть сформовані сигнали з високим рівнем напруги, які можна передавати на віддалені пристрої через дротові лінії зв'язку. MAX232 має чотири незалежних інвертуючих входи і виходи. Кожен вихід мікросхеми має два стани: високий і низький рівні напруги, що відповідають логічним значенням "1" і "0" відповідно. Входи мікросхеми також мають два стани: логічне "1" і "0". Коли на вхід мікросхеми подається логічне "1", на виході буде сформований сигнал з високим рівнем напруги, а коли подається логічне "0", буде сформований сигнал з низьким рівнем напруги. Для підключення до пристрою використовується роз'єм моделі MOLEX 22-23-2031, який буде з'єднуватися з СОМ-портом комп'ютера. Таке підключення дозволить передавати дані між мікросхемою і комп'ютером за допомогою стандартного RS-232 інтерфейсу. Живлення MAX232 забезпечується з джерела +5 В, а конденсатори на 1  $\mu\text{F}$  та резистори на 4.7 кОм використовуються для стабілізації живлення, забезпечення належного заземлення та правильної роботи мікросхеми. Максимум232 (MAX232) є дуже поширеною мікросхемою для рівнів логічних сигналів RS-232. Вона забезпечує перетворення напруги та логіки між логічними рівнями TTL (Transistor-Transistor Logic) і RS-232 (Recommended Standard 232). Це особливо корисно, коли потрібно зв'язати мікроконтролер або іншу електронну приставку зі стандартним портом RS-232 на комп'ютері або іншому пристрої. MAX232 має чотири незалежні інвертуючі входи та виходи, які забезпечують передачу даних у форматі RS-232. Це дає можливість надсилати та отримувати дані за допомогою сигналів RS-232 зі стандартними рівнями напруги. Зв'язок з комп'ютером виконується шляхом підключення вихідних ліній MAX232 до вхідних ліній порту RS-232 комп'ютера. В результаті будуть сформовані сигнали з високим рівнем напруги, що передаються через дротові лінії зв'язку. Таке підключення дає можливість передавати дані між пристроями з різними рівнями логічних сигналів.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40



## 6 РІВНЯННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ.

### 6.1 Рівняння функції перетворення

Складено рівняння функції перетворення:

$$N = F(K_{\text{ЕД}}; K_{\text{ІП}}; K_{\text{АЦП}}) \quad (1)$$

де  $K_{\text{ЕД}}$  – коефіцієнт перетворення давача напруженості електричного поля;  $K_{\text{ІП}}$  – коефіцієнт перетворення інструментального підсилювача;  $K_{\text{АЦП}}$  – коефіцієнт перетворення АЦП.

Отримано вираз (2):

$$N = K_{\text{ЕД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}} \quad (2)$$

Коефіцієнтом перетворення давача напруженості електричного поля є відношення вихідної напруги до номінального значення напруженості електричного поля:

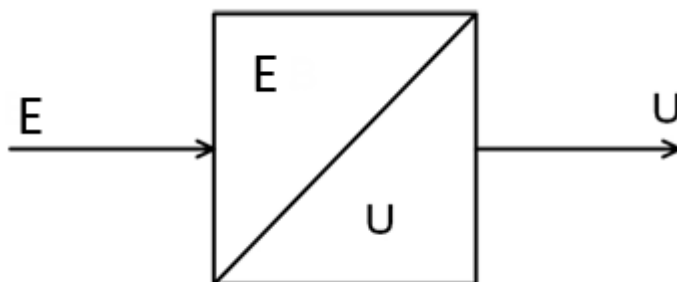


Рис. 20 – Давач напруженості електричного поля

Виходячи з специфікації на давач РА3001 [17]

$$U_{\text{дн}} = 36 \text{ мВ}$$

$$E_{\text{н}} = 36 \text{ мкВ/м}$$

визначаємо необхідний коефіцієнт підсилення індустріального підсилювача:

За технічною специфікацією чутливість давача напруженості електричного поля становить [14]:

$$\alpha = 8 \text{ мкВ/м}$$

Визначемо коефіцієнт перетворення давача:

$$K_{\text{ЕД}} = \frac{U_{\text{двнк}}}{E_{\text{н}}} = \frac{36 \text{ мВ}}{36 \text{ мкВ/м}} = 1000 \quad (3)$$

					ПА91.030008.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Коефіцієнтом підсилення інструментального підсилювача є відношення зворотного опору до вхідного опору. На принциповій схемі зображені як  $R_{18}$  і  $R_4$ .

$$K_{\text{П}} = \frac{R_{18}}{R_4} = 91,67 \quad (4)$$

Підставивши значення  $R_4 = 1\text{кОм}$  отримаємо необхідний опір зворотнього входу інструментального підсилювача:

$$R_{10} = K_{\text{П}} \cdot R_4 = 91,67 \cdot 1 = 91,67\text{кОм} \quad (5)$$

Для знаходження коефіцієнту АЦП розглянуто відношення вихідного коду до вхідного аналогового сигналу.

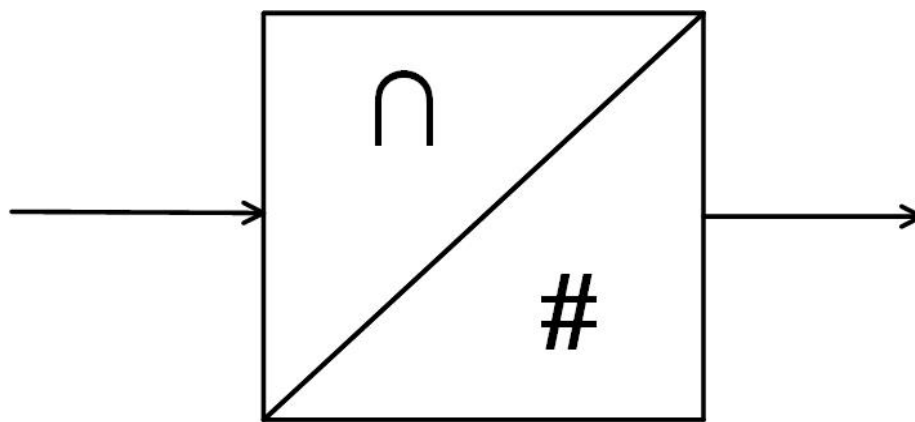


Рис. 21 – Аналого-цифровий перетворювач

Значення коду сформовано рівнянням відношення добутку вхідної напруги та кількості розрядів на опорну напругу АЦП. Якщо не встановлювати зовнішню опорну напругу для мікроконтролера, значенням опорної напруги АЦП буде живлення мікроконтролера, що дорівнює 3,3В. За технічною специфікацією АЦП мікроконтролерів серії STM32F207 має 12 розрядів [16]. Використано 11 розрядів. 12 розряд відповідає за знак. Маємо рівняння коду (6):

$$N = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 2^{11}}{U_{\text{ОПР АЦП}}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot 2^{11}}{3,3\text{В}} \quad (6)$$

Підставивши номінальні значення отримано максимально допустиме значення коду. Номінальним вхідним значенням є добуток вихідного значення напруги та коефіцієнта підсилення.

$$U_{\text{вхн}} = U_{\text{вих}} \cdot K_{\text{П}} = (36 \cdot 10^{-3} \cdot 91,67) = 3,3\text{В} \quad (7)$$

$$N_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вхн}} \cdot 2^{11}}{U_{\text{ОПР АЦП}}} = \frac{3,3 \cdot 2^{11}\text{В}}{3,3\text{В}} = 2048 \quad (8)$$

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Коефіцієнтом АЦП є відношення вихідного коду до вхідної напруги, що характеризує аналоговий сигнал.

$$K_{\text{АЦПН}} = \frac{N_{\text{Н}}}{U_{\text{вх Н}}} \quad (9)$$

Підставивши номінальні значення в рівняння (10) одержано вираз коефіцієнт перетворення АЦП:

$$K_{\text{АЦП}} = \frac{N_{\text{Н}}}{U_{\text{вх Н}}} = \left( \frac{2^{11}}{3,3} \right) = 620,6 \frac{1}{\text{В}} \quad (10)$$

Рівняння функції перетворення, підставивши отримані коефіцієнти в рівняння (2), отримаємо максимальне допустиме значення коду  $2^{11}$ .

$$N = E_{\text{Н}} \cdot K_{\text{ЕД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}} = 36 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 91,67 \cdot \left( \frac{2^{11}}{3,3} \right) = 2048 = 2^{11} \quad (11)$$

## 6.2 Аналіз невизначеності результатів вимірювання

Визначити невизначеність результатів давача напруженості електричного поля є неможливим, бо в доступній технічній специфікації є лише нестохастичні значення похибок [17]. Замість цього проведений аналіз оцінки мультиплікативної та адитивної похибки і приведено кінцеве рівняння їх впливу на формування коду.

Складено аналіз мультиплікативної похибки. Вона є сумою мультиплікативних похибок давача напруженості електричного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача.

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{ЕД}} + \gamma_{\text{ІП}} + \gamma_{\text{АЦП}} \quad (12)$$

Мультиплікативна похибка давача напруженості електричного поля характеризується лінійною похибкою, що за технічною специфікацією [17] при номінальному значенні напруженості електричного поля 36 мкВ/м при живленні 5 В дорівнює 1%.

$$\gamma_{\text{ЕД}} = 1\%$$

Мультиплікативна похибка інструментального підсилювача є різницею похибок резисторів, де знак обирається в більшу сторону.

$$\gamma_{\text{ІП}} = \gamma_{R_{1\text{а}}} - \gamma_{R_{\text{д}}} = 0,5\% \pm 0,5\% = 1\%$$

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Мультиплікативна похибка АЦП за технічною специфікацією [10] складає 1%.

$$\gamma_{\text{АЦП}} = 1\%$$

Підставивши значення в рівняння (13), отримано загальну мультиплікативну похибку 3%.

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{\text{МД}} + \gamma_{\text{Ш}} + \gamma_{\text{АЦП}} = 1\% + 1\% + 1\% = 3\% \quad (13)$$

Складено аналіз адитивної похибки. Вона є сумою стохастичних і нестохастичних похибок давача напруженості електричного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача.

Стохастичну похибку давача напруженості електричного поля характеризує значення щільності шуму. За технічною специфікацією воно становить  $29 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на 1 Гц [17]. При 100 Гц матимемо значення діапазоном до  $300 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$ . Це дуже мале значення, що дає право знехтувати ним.

Стохастичну похибку інструментального підсилювача характеризує значення шуму. За технічною специфікацією воно становить на вході  $8 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  та  $80 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$  на виході [10]. Це дуже малі значення, що дає право знехтувати ними.

Нестохастичну похибку інструментального підсилювача характеризує значення зміщеної напруги. За технічною специфікацією діапазон зміщеної напруги становить до  $60 \text{ мВ}$  [10].

$$\Delta_{\text{стох. Ш}} = 60 \text{ мВ}$$

Оцінка максимальної похибки АЦП складає

Нестохастичну похибку АЦП характеризує половина одиниці молодшого розряду. Одиниця молодшого розряду АЦП є відношенням опорної напруги АЦП на максимальне двійкове одинадцятирозрядне число.

$$\Delta = \frac{U_{\text{ОПР АЦП}}}{2^{11}} = 0,001 \text{ В} \quad (14)$$

$$\Delta_{\text{стох. АЦП}} = 0,0005 \text{ В} \quad (15)$$

Підставивши значення отримано загальну адитивну похибку:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{\text{стох. Ш}} + \Delta_{\text{стох. АЦП}} = 60 \text{ мВ} + \frac{1,65}{2^{11}} \text{ В} = 865 \cdot 10^{-6} \text{ В} \quad (16)$$

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кінцеве рівняння коду з урахуванням мультиплікативної та адитивної похибки має вигляд:

$$N = B_{\text{вх}} \cdot (K_{\text{МД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}}) \cdot (1 + \gamma_3) + \Delta \cdot \Delta_3 \quad (17)$$

Підставивши значення похибок маємо рівняння:

$$N = E_{\text{вх}} \cdot (K_{\text{ЕД}} \cdot K_{\text{ІП}} \cdot K_{\text{АЦП}}) \cdot (1 + 3\%) + 0,86 \quad (18)$$

Значення відносної адитивної похибки 0,03% набагато менше мультиплікативної похибки вимірювального каналу

Висновок до 6 розділу

В даному розділі складено рівняння функції перетворення та проаналізовано невизначеність результатів вимірювання автоматизованої системи вимірювання параметрів напруженості електричного поля рухомого об'єкту. Було розроблено рівняння функції перетворення. Розраховані коефіцієнти давача напруженості електричного поля, інструментального підсилювача та аналого-цифрового перетворювача. Проведено аналіз мультиплікативної та адитивної похибки. Визначено оцінку максимального значення похибки вимірювального каналу в межах 3%.

## ВИСНОВКИ

У ході дипломного проєкту була розроблена автоматизована система контролю збудження джерел електричного поля. Проведений огляд наявних технічних рішень та компонентів, необхідних для створення системи, і було здійснено вибір сучасних комплектуючих з обґрунтуванням їх використання. Розроблена система здатна вимірювати значення електричного поля.

У дипломному проєкті було представлено та обґрунтовано вибір структурної схеми комплексу, на основі якої була розроблена функціональна схема. З урахуванням структурної та функціональної схем була розроблена електрична принципова схема.

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						46
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ЛІТЕРАТУРА

1. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів за напрямком 6.051.001 "Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології"/ Укладачі: Є. Т. Володарський, Є. В. Грещенко, В. І. Губар, В. В. Літвіх – Київ : НТУУ (КПІ), - 40с.- Укр. мовою.
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: В 3-х т. Підручн. для студ. електротехн. спеціальн. вищих закл. осв. Том 1 / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб [та ін.]; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка.– К.: ІВЦ «Політехніка», 2004. – 272 с.
3. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: В 3-х т. Підручн. для студ. електротехн. спеціальн. вищих закл. осв. Том 2 / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб [та ін.]; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2008. – 224 с.
4. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: В 3-х т. Підручн. для студ. електротехн. спеціальн. вищих закл. осв. Том 3 / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб [та ін.]; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2013. – 244 с.
5. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 463 с.
6. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 2. – 4-е изд. / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 576 с.
7. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. – 4-е изд. / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 377 с.

					ПА91.030008.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47



16. STM32F207 Datasheet // – Режим доступу:  
<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/551708/STMICROELECTRONICS/STM32F207.html> – Дата доступу: 14.06.11 – STMicroelectronics.

17. UEP and ELFE carbon fibre Sensors // – Режим доступу:

<https://www.polyamp.com/images/pdf/UEP%20sensors.pdf>

					<i>ПА91.030008.001 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49