

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

Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології неруйнівного контролю і діагностики»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Вимірювач напруженості електричного поля»

Виконав:

студент ІV курсу, групи ПК-61 Белак Артур Сергійович _____

Керівник:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Консультант з графічного розділу:

ст.вик., к.т.н. Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з розробки ел. схеми:

к.т.н., доцент Баженов Віктор Григорович _____

Рецензент:

к.т.н. доцент Мокійчук В.М _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК6102.0000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	41	
3	A1	ПК6102.0000.001 СК	Складальне креслення	1	
4	A1	ПК6102.0000.002 Е1	Схема електрична структурна	1	
5	A2	ПК6102.0000.003 Е3	Схема електрична принципова	1	
6	A3	ПК6102.0000.004 ТК	Корпус	1	
7	A3	ПК6102.0000.005 ТК	Крильчатка	1	

				ПК6102.0000.000	
	ПІБ	Підп.	Дата		
Розробн.	Белак А.С			Лист	Листів
Керівн.	Баженов В.Г.			1	1
Консульт.				Відомість дипломного проєкту	
Н/контр.	Лашко О.В.				
Зав.каф.	Протасов А.Г.				
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-61	

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Вимірювач напруженості електричного поля»

Київ – 2020 року

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

**Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Белак Артур Сергійович

1. Тема проєкту «Вимірювач напруженості електричного поля», керівник проєкту Баженов Віктор Григорович, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2020 року

3. Вихідні дані до проєкту: метод вимірювання електростатичного поля, компактність;

4. Зміст пояснювальної записки

Вступ

1. Аналітичний огляд

2. Розробка приладу

Висновки

Список використаних джерел

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

1 – Схема електрична принципова

2 – Схема електрична структурна

3 – Складальне креслення

4 – Крильчатка

5 – Корпус

6. Консультанти розділів проєкту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Графічний	ст.вик., к.т.н. Богдан Г.А.		
Електричний	к.т.н., доцент Баженов В.Г.		

7. Дата видачі завдання 15 лютого 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Формулювання завдання проєкту	10.02.2020	
2	Обговорення змісту ПЗ	18.02.2020	
3	Проведення аналітичного огляду	20.03.2020	
4	Оформлення пояснювальної записки	24.04.2020	
5	Розробка креслеників	03.06.2020	

Студент

Артур БЕЛАК

Керівник

Віктор БАЖЕНОВ

Анотація

Впродовж дипломного проєкту 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. Також 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.

Предмет дослідження: методи вимірювання електростатичного поля.

Наукова новизна: малогабаритний пристрій для вимірювання електростатичного поля.

Дипломний проєкт складається із пояснювальної записки обсягом 41 сторінок, включає 10 ілюстрацій, 1 таблицю, 5 креслеників, 9 посилань та 47 формул.

Annotation

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, 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.

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

The diploma project consists of an explanatory note of 41 pages, includes 10 illustrations, 1 table, 5 drawings, 9 references and 47 formulas.

Скорочення та позначення

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

НК – неруйнівний контроль.

ЕП – електричне поле.

ЕРС – електрорушійна сила.

ОК – об'єкт контролю.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. Аналітичний огляд	8
1.1. Електричне поле	8
1.2. Електричне поле в атмосфері.....	10
1.2.1. Річний і добовий хід напруженості електричного поля.....	13
1.2.2. Зв'язок між напруженістю електричного поля і іншими атмосферно-електричними і метеорологічними величинами	14
1.3. Електричні методи НК.....	16
1.4. Методи безпосереднього виміру напруженості електростатичного поля в атмосфері.	19
1.4.1. Статичний метод	19
1.4.2. Динамічний метод.....	22
2. Розробка приладу	36
2.1. Схема та принцип роботи приладу	36
2.2. Вибір мікроконтролера.....	38
2.3. Підбір двигуна	40
2.4. Вибір датчика синхронізації положення пластин.....	41
Висновок	45
Список використаних джерел.....	46

					ПК 6102.0000.000ПЗ						
ЗМН	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Вимірювач напруженості електричного поля			Літ.	Арк.	Аркушів	
Розроб.		Белак А.С.									41
Перевір.		Баженов В.Г.									
Н. Контр.											
Затверд.		Баженов В.Г.						ПБФ, ПК-61			

Вступ

Задача вимірювання напружених електричних електричних полей впливає на різні промисловості, пов'язані з виробництвом або з широким використанням синтетичних матеріалів, де може бути використана статична електричність і що може привести до серйозних наслідків.

Також з давніх часів вчені цікавились вимірюванням електростатичних полів атмосфери.

Розширення географії та збільшення інтенсивного вимірювання атмосферного електричного середовища привели до того, що було виявлено зв'язок з геомагнітними аномаліями земної кори. Це відкриття цікавить геофізиків, використовуючи його для вирішення завдань пошуку та розвідки корисних копалин, а також вирішення задач інженерної геології.

Також вимірювання електростатичних полів атмосфери, могли б допомогти в вивченні, а в майбутньому і прогнозуванні погодних явищ.

Найбільш інформативний параметр електростатичного поля – напруженість.

Але дана задача вимагає спеціальної апаратури і методів, тому на даний момент приладів, які могли б вимірювати напруженість електростатичного поля дуже мало.

					<i>ПК6102.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Аналітичний огляд

1.1. Електричне поле

Електричне поле завжди існує навколо електричного заряду і має дві характеристики: силову - напруженість електричного поля в даній точці, і енергетичну - потенціал електричного поля в даній точці.

Напруженість електричного поля в деякій точці визначається вектором, рівним силі, піднесеної до одиниці заряду і діючої на позитивний заряд, розташований в даній точці. Цей заряд повинен бути досить малий, щоб його присутність не викликало перерозподілу других зарядів. Останнє обмеження необхідно через явища електростатичної індукції.

Подібно до того, як дія на тіло декількох механічних сил може бути зведена до дії однієї результуючої сили, що є їх векторної сумою, результуюча напруженість електричного поля, створеного деяким розподілом зарядів, може бути отримана як векторна сума напруженості полів, створених окремими елементами цього розподілу, дане явище називається принцип суперпозиції. Таким чином, напруженість електричного поля в точці Р, створеного n зарядами, що знаходяться в нескінченно однорідному середовищі з діелектричною проникністю ϵ , дорівнює:

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^3} r_i \quad (1.1)$$

де E_p - напруженість електричного поля (в вольтах на метр), r_i - вектор, рівний по модулю r_i і спрямований з точки Р до заряду q_i .

При переміщенні заряду в електролітичному полі відбувається робота. Потенціалом точки Р електростатичного поля називається робота (в джоулях на кулон) по переміщенню заряду з точки нульового потенціалу в точку Р. Вибір точки нульового потенціалу - справа зручності. Дуже часто, хоча і не завжди, вона вибирається на нескінченності. Величина заряду має бути досить малою, щоб не викликати перерозподілу електрики. Щоб уникнути явищ неелектростатичного характеру, переміщати заряд потрібно дуже повільно.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

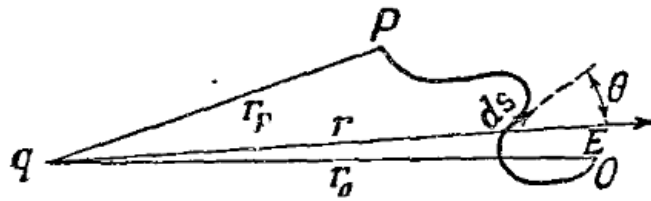


Рис.1.1 – Вектор переміщення потенціалу

Обчислимо потенціал поля точкового заряду q . Робота dV , необхідна для переміщення одиничного заряду на відстань ds в поле E , дорівнює $-E * ds$, або $-E ds \cos \theta$, де θ - кут між E і ds . У разі поля точкового заряду вона дорівнює:

$$dV = -\frac{q \cos \theta}{4\pi\epsilon r^2} ds \quad (1.2)$$

де r - вектор, спрямований від заряду q до елементу шляху ds , і θ – кут між r і ds , як показано рис.1. Очевидно, що $dr = ds \cos \theta$, тому для потенціалу маємо:

$$\int_0^{V_p} dV = -\frac{q}{4\pi\epsilon} \int_{r_0}^{r_p} \frac{dr}{r^2} \text{ або } V_p = \frac{q}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (1.3)$$

Якщо вибрати r_0 нескінченним, то:

$$V_p = \frac{q}{4\pi\epsilon r_p} \quad (1.4)$$

Електростатичний потенціал є скалярною функцією точки і не залежить від шляху, по якому заряд приноситься в цю точку. потенціал в будь-якій точці електростатичного поля може бути отриманий шляхом складання потенціалів окремих зарядів, що створюють поле, таким чином,

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \quad (1.5)$$

де r_i - відстань між P і q_i .

Оскільки скалярна сума значно простіше векторної, то зрозуміло, чому при обчисленнях за краще мати справу з виразом(1.5), а не з (1.2). Напруженість поля в точці P можна знайти з виразу (1.5).

У прямокутних координатах компоненти напруженості поля рівні:

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (1.6)$$

Компоненти градієнта в будь-якій іншій фіксованою системі координат можна отримати, якщо виразити V , x , y і z через координати цієї системи.

Якщо відстань між елементарними зарядами мала в порівнянні з усіма іншими розглянутими розмірами, то розподіл зарядів можна вважати безперервним і можна говорити про їх об'ємну щільність ρ , і про поверхневу щільності σ (заряд на одиницю поверхні). Сума (1.5) переходить в цьому випадку в інтеграл:

$$V_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho dV}{r} + \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{\sigma dS}{r} \quad (1.7)$$

де dv - елемент обсягу, dS - елемент поверхні. Необхідно зауважити, що ці формули можуть бути застосовані тільки тоді, коли весь навколишній простір, а також матеріальні тіла, що знаходяться в ньому мають діелектричну проникність ϵ .

1.2. Електричне поле в атмосфері

Провівши через точки з однаковим значенням потенціалу безперервні поверхні, отримаємо рівневі, або ізопотенціальні поверхні. Ці поверхні в силу відомих властивостей потенціалу не можуть ні перетинатися один з одним, ні торкатися.

Взявши в будь якій точці рівної поверхні похідну від потенціалу по нормалі до неї n , отримаємо для цієї точки повну напруженість поля:

$$E = -\frac{dV}{dn} = -gradV \quad (1.8)$$

Звідси випливає, що в тих місцях, де рівень поверхні зближуються, напруженість поля буде за абсолютною величиною більше, і навпаки. Рівневі поверхні приблизно слідує за рельєфом земної поверхні, зближуючись над усіма височинами і розсовуючи над поглибленням. З висотою їх хід поступово вирівнюється.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безпосередньо біля земної поверхні, що є провідником, для напруженості поля маємо співвідношення:

$$E_0 = -\frac{dV}{dh} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon} \quad (1.9)$$

де σ - щільність поверхневого заряду в даній точці.

При наявності в атмосфері об'ємних зарядів в кожній точці атмосфери має бути виконано також рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho \quad (1.10)$$

З формули (2.3) видно, що напруженість поля в будь-якій точці чисельно дорівнює зміні потенціалу, розрахованому на одиницю відстані в напрямку нормалі до рівної поверхні, проведеної в сторону спадного потенціалу. На практиці напруженість поля і чисельно рівний їй, але зворотний за знаком, градієнт потенціалу вимірюється в вольтах на метр (В / м).

Зазвичай стосовно до атмосфері зазначені співвідношення використовуються лише з деяким наближенням. дійсно, хоча атмосфера є середовищем неоднорідним в електричному відношенні, проте в більшості випадків неоднорідність її в горизонтальному напрямку набагато менше, ніж у вертикальному. Це дає можливість в першому наближенні знехтувати урахуванням горизонтальних неоднорідностей і розглядати поле над великою плоскою рівниною як однорідне. Для опису поля в атмосфері можна спростити рівняння (2.3) і (2.5), замінивши нормаль і координату z через висоту h і поклавши $\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{d^2 V}{dy^2} = 0$. Тоді:

$$\frac{d^2 V}{dh^2} = -\frac{dE}{dh} = -\frac{1}{\epsilon_0 \epsilon} \rho \quad (1.11)$$

Спостереження, проведені в земної поверхні, дають в середньому для градієнта потенціалу значення близько 130 В / м. Застосувавши рівняння (2.4), можна обчислити середнє значення поверхневої густини об'ємного заряду Землі σ , яка дорівнює приблизно $-1,15 \cdot 10^9 \text{ Кл/м}^2$. Так як поверхня Землі

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дорівнює $4\pi R^2$, де R - радіус Землі, то заряд Землі дорівнює $Q = 4\pi R^2 \sigma = -5,7 * 10^5 \text{Кл}$.

Напруженість електричного поля атмосфери може бути розрахована за вимірюваним значенням вертикального струму провідності атмосфери i і значенням провідності λ :

$$E = \frac{i}{\lambda} \quad (1.12)$$

Струм провідності атмосфери не змінюється з висотою. Отже, напруженість електричного поля залежить, по-перше, від провідності атмосфери, по-друге, від об'ємних зарядів в атмосфері, локалізованих в досліджуємої області. Тому зміни напруженості поля відповідають зміні провідності, але на це накладається вплив неоднорідностей об'ємних зарядів атмосфери.

На рисунку представлена схема формування електричного поля атмосфери Землі і електричних струмів в біосфері показано, які космічні і земні чинники роблять визначальний вплив на ці процеси.

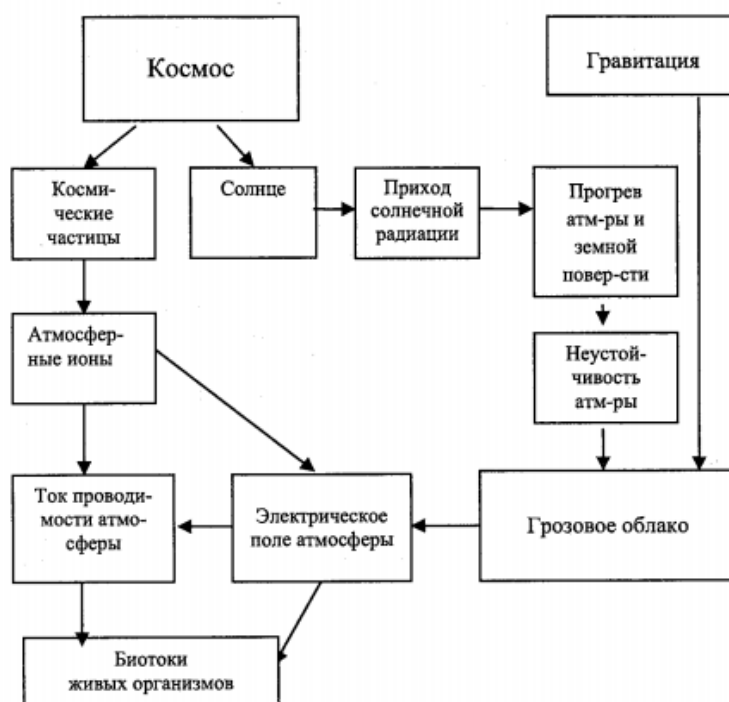


Рис.1.2 – Схема формування електричного поля атмосфери Землі і електричних струмів в біосфері.

1.2.1. Річний і добовий хід напруженості електричного поля

Напруженість електричного поля виявляє правильні річні і добові коливання. Річний хід поля в середніх широтах Північної півкулі простий - з одним максимумом взимку (грудень-лютий) і одним мінімумом влітку (червень-серпень), причому амплітуда річних коливань зменшується від середніх широт до більш південним і до полярних областях. Типовим є річний хід, що спостерігається, наприклад, в Санкт-Петербурзі. У тропічних областях (наприклад, на о. Ява) частіше спостерігається подвійний річний хід: з двома максимумами і двома мінімумами.

У Південній півкулі в середньому найменші і найбільші значення, правда, при меншій амплітуді, спостерігаються в ті ж місяці, що і в Північній півкулі, т. е. зміни напруженості електричного поля протягом року відбуваються однаково для всієї Землі.

Добовий хід напруженості поля являє особливо великий інтерес. Розрізняють два основних типи:

1. Добовий хід над океанами, де, майже незмінний протягом року, має простий характер з максимумом близько 18 годин і мінімумом в 4 години по грінвічевському часу, причому крайні значення настають одночасно на всіх океанах. Ці зміни, протікають по деякому універсальному часу, отримали назву унітарної варіації.

Такий же за формою добовий хід спостерігається в полярних областях і скрізь на деякій висоті над рівнем земної поверхні; нерідко він спостерігається в зимові місяці і у земної поверхні, але тільки в високих широтах.

2. Над сушею поблизу земної поверхні добовий хід більш складний. У більшості місць він має характер подвійної хвилі з двома максимумами і двома мінімумами, при цьому вторинний максимум і мінімум настають за місцевим часом. Головний мінімум спостерігається в ранні ранкові години (3-5 ч), вторинний - після полудня, головний максимум у вечірні години (18-22 год), вторинний - перед полуднем. Час настання добових крайніх значень зміщується в різні місяці, і взагалі вигляд кривої добового ходу протягом року

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

сильно змінюється. У літню пору особливо глибоким виявляється післяполудневий мінімум.

Аналіз питання про особливості добового ходу показав, що поява вторинних максимуму і мінімуму над сушею обумовлено впливом приземного шару, що призводить до збільшення чи зменшення об'ємних зарядів і змін в провідності. В результаті добовий хід напруженості поля над сушею (в приземному шарі) можна розглядати як результат накладення на основний простий хід, в досить чистому вигляді спостерігається над океанами і викликається спільними для всієї земної кулі причинами тих коливань поля, які слід називати місцевими.

Залежно від того, які із зазначених причин опиняються в даному місці в певний момент часу визначальними, змінюється і характер добового ходу напруженості електричного поля.

1.2.2. Зв'язок між напруженістю електричного поля і іншими атмосферно-електричними і метеорологічними величинами

Описаний характер змін напруженості електричного поля досить чітко виявляється при спостереженнях в зазначені вище «нормальні» дні. Його можна виявити і з щоденних даних при будь-яких погодних умовах, обробляючи спостереження за тривалий проміжок часу (кілька років). Зазвичай же електричне поле відчуває неправильні і нерідко великі коливання, обумовлені впливом об'ємних зарядів і зміною провідності. Тому між напруженістю поля і іншими атмосферно-електричними і метеорологічними характеристиками атмосфери існує дуже тісний зв'язок.

Це видно вже з того, що середні значення E в різних повітряних масах виявляються помітно відмінними. У таблиці приведена значення E в різних повітряних масах з роботи Кеніссфельда.

Особливо тісний зв'язок між напруженістю поля E і провідність λ , яка виражається в тому, що ці величини змінюються в протилежних напрямках не тільки в добовому і річному ході, але часто в кожен окремо взятий момент.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

При такому тісному зв'язку між напруженістю поля і провідністю всі метеорологічні умови, що впливають на провідність, іноді навіть більш чітко впливають і на напруженість електричного поля. Особливо сильно позначається ступінь запиленості повітря, при якій знижується провідність і різко збільшується напруженість. Цілком зрозумілий її зв'язок з дальністю видимості, при покращенні якої E сильно зменшується.

Напруженість електричного поля біля поверхні землі в різних повітряних масах приведена в таблиці:

Повітря	E , В/м
Арктичний	282
Полярно континентальний	201
Континентальний	159
Полярний морський	117
Морський	79

Таблиця 1

Були відзначені дуже високі значення градієнта потенціалу при антициклонах з полярним повітрям. Це можна пояснити тим, що полярні маси повітря містять в собі позитивний просторовий заряд. Тому можна припустити, що вимірювання градієнта потенціалу можуть бути корисним доповненням до інших метеорологічним вимірам.

Що стосується зв'язку E з окремими метеорологічними величинами, то, так само як і щодо провідності, можна сказати, що вона є непрямою і обумовлена тим, наскільки ті чи інші метеорологічні умови сприяють зміні об'ємних зарядів і їх розподілу в атмосфері, а також зміні провідності.

Особливий інтерес представляє зв'язок між градієнтом потенціалу та пружністю водяної пари, зі збільшенням останньої зростає і E . Цей зв'язок проявляється і в спільності характеру добового ходу цих величин.

У ряді випадків встановлюється зв'язок між напруженістю поля і вітром.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

При досить великій швидкості вітру із земною поверхні відриваються заряджені частинки пилу, і утворюються об'ємні заряди впливають на поле. іноді вітром приносяться об'ємні заряди з боку, від місць їх утворення (Велике місто, фабрично-заводські райони). Напруженість поля сильно змінюється і зазнає нерегулярні коливання в туманах, при наявності хмар і особливо при випаданні опадів і при грозах. Так як в туманах і хмарах провідність значно (в середньому в 3 рази) менше, то при їх невеликій вертикальній потужності напруженість поля в них відповідно збільшується. Разом з тим може позначитися і вплив об'ємних зарядів, що утворюються в них при певних умовах.

Можна вважати, що хмари високих ярусів майже не надають помітного впливу на напруженість поля в земної поверхні. Вплив низьких хмар може бути значним, особливо у випадках, коли в них утворюються великі частки і випадають опади. Так як виникаючі об'ємні заряди мають і позитивний і негативний знак, а по величині можуть бути значними, то і поле може змінюватися в дуже широких межах, змінюючи іноді і свій напрямок на протилежне. Цілком очевидно, що хмари і об'ємні заряди в атмосфері спотворюють вказаний вище розподіл поля з висотою і до того ж самим незакономірним чином.

Зазначений вплив чисто місцевих умов призводить до того, що напруженість поля і його добовий хід у земної поверхні нерідко виявляються кілька різними навіть у двох близько розташованих пунктах.

1.3. Електричні методи НК

В основу електричних МНК покладено принцип постійної фіксації і аналізу властивостей електричного поля, яке:

- 1) взаємодіє з контрольованим предметом;
- 2) виникає в самому об'єкті в результаті зовнішнього впливу.

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

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

параметрами об'єкта.

Суть електричних МНК відмінно демонструє електропотенціальний метод, при якому потрібно чітко реєструвати і аналізувати падіння потенціалу.

Як працює метод:

- До металевого тіла потрібно підвести електрична напруга.
- В результаті в ньому виникає електричне поле, при цьому точки з однаковим потенціалом створюють еквіпотенціальні лінії.
- Сила напруги падає в місці заводського браку або пошкодження предмета в процесі експлуатації.
- Вимірюють напругу за допомогою електродів і на підставі отриманих відомостей роблять висновки про властивості і розмірі дефекту.

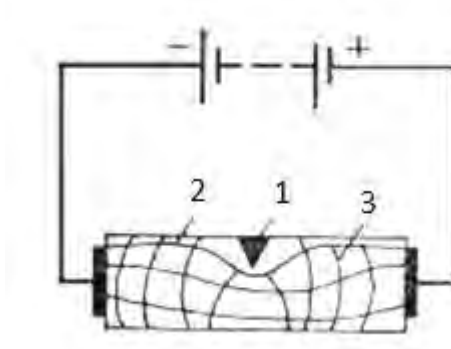


Рис.1.3

На рисунку 1.3 зображено принцип роботи електропотенціального методу:

- 1) Тріщина
- 2) Лінії тока
- 3) Еквіпотенціальні лінії

Для контролю якості виробів з твердих провідникових матеріалів (металу і сплавів різної модифікації) застосовують і інші електричні методи:

- 1) Ємнісний - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації ємності ділянки об'єкта контролю, використовується для контролю стандартів напівпровідників і діелектриків;

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 2) Термоелектричний - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації величини термо електро-рушійної сили, що виникає при прямому контакті нагрітого зразка відомого матеріалу з об'єктом контролю (для контролю хімічного складу матеріалу);
- 3) Трибоелектричний - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації величини електричних зарядів, що виникають в об'єкті контролю при терті різнорідних матеріалів;
- 4) Електроіскровий - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації виникнення електричного пробую і (або) змін його параметрів в навколишньому об'єкта контролю середовищі або на його ділянці;
- 5) Електростатичного порошку - метод електричного неруйнівного контролю, оснований на реєстрації електростатических полей рассеяния с использованием в качестве индикатора наэлектризованного порошка;
- 6) Електропотенціальний - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації розподілу потенціалів по поверхні об'єкта контролю;
- 7) Рекомбінаційного випромінювання - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації рекомбінаційного випромінювання р-п переходів у напівпровідникових виробках;
- 8) Екзоелектричної емісії - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації екзоелектронів, емітованих поверхнею контрольованого об'єкта при прикладані до нього зовнішнього стимулюючого впливу;
- 9) Контактної різниці потенціалів - метод електричного неруйнівного контролю, заснований на реєстрації контактної різниці потенціалів на ділянках об'єкта контролю, через який пропускається електричний струм.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.4. Методи безпосереднього виміру напруженості електростатичного поля в атмосфері.

Якщо в електричне поле внести провідне тіло, останнє поляризується.

Щільність заряду в будь-якій точці тіла σ буде рівна $\sigma = \frac{E_n}{4\pi}$, до того ж E_n – напруженість поля, нормальна до поверхні в тій її точці, де вимірюється σ .

Між E_n і напруженістю поля E , яка існувала до внесення тіла в електричне поле, існує залежність $E_n = kE$, де k -коефіцієнт порушення, який визначається конфігурацією тіла, і конфігурацією поля. Якщо поле до внесення тіла можна було рахувати рівномірним, то k визначається тільки конфігурацією тіла і положенням його в полі.

Таким чином, між напруженістю електричного поля і щільністю поверхневого заряду на провідному тілі існує пряма пропорційність.

Всі методи безпосереднього виміру напруженості поля в атмосфері засновуються на вимірюванні тим, чи іншим методом щільність поверхневого заряду на тілі, внесеному в електричне поле

1.4.1. Статичний метод

Розглянемо принципіальну схему вимірювання(рис.1.4, а)

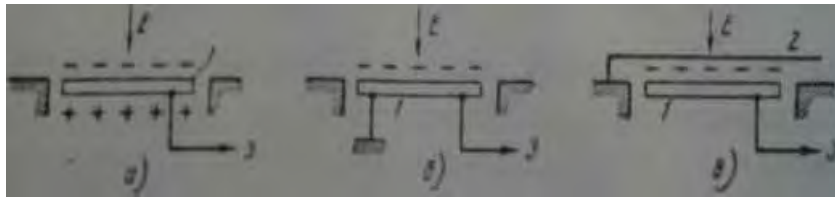


Рис.1.4 Статичний метод вимірювання напруженості поля: а) пластина відкрита, б) пластина заземлена, в) пластина після припинення заземлення екранована.

Нехай металева пластина 1 площею S см² встановлена на рівні землі і знаходиться в полі напруженості E . При такому розташуванні пластинки поле E не спотворюється $E = E_n$ так як $k=1$.

Заряд q , індукований на пластині 1, буде дорівнювати:

$$q = \sigma S = \frac{ES}{4\pi} \quad (1.13)$$

а потенціал, створюваний ним:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{ES}{4\pi C} \quad (1.14)$$

де C -ємність пластини 1 і з'єднаних з нею провідників. Якщо за допомогою електрометрії виміряти потенціал вимірювальної пластини, то напруженість поля E можна визначити за формулою:

$$E = \frac{4\pi C}{S} V = AV \quad (1.15)$$

де $A = \frac{4\pi C}{S}$ – постійна прибора.

Реєструючи положення нитки електрометра, можна, таким чином, отримати запис електричного поля. У цих вимірах ускладнюючими обставинами є необхідність підтримувати досконалу ізоляцію пластини 1 і необхідність враховувати дію вертикального струму, що створює заряд на пластині 1 і тим самим змінює покази електрометра. Електрометр не можна відносити далеко від пластини 1, так як це збільшить ємність C і, отже, знизить чутливість приладу.

Якщо заземлити вимірювальну пластину 1 (рис.1.4, б), то потенціал її стане рівним нулю. Якщо потім перервати заземлення та пластину 1 екранувати від поля E за допомогою металевого екрана 2 (рис.1.4, в), то пластина набуває потенціал:

$$V = -\frac{q}{C'} = -\frac{ES}{4\pi C'} \quad (1.16)$$

де E -напруженість поля в момент переривання заземлення, а C' - ємність дещо більша, ніж C , за рахунок наближення до пластині 1 заземленого металевого екрану 2.

Таким чином, описаний метод дозволяє двома способами вимірювати безпосередньо напруженість поля біля поверхні землі, причому спотворення, що вносяться вимірювальним приладом, зводяться до необхідного мінімуму.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо вимірювальна пластина ставиться не на рівні поверхні землі, а трохи вище або нижче, або вона з якоїсь причини не може бути зроблена плоскою, то всі міркування залишаються в силі, тільки коефіцієнт порушення до вже не можна вважати рівним одиниці і

$$E = \frac{1}{k} \frac{4\pi C}{S} V = \frac{1}{k} AV \quad (1.17)$$

Для проведення абсолютних вимірювань при установці приладу доводиться визначати величину k . Це робиться, так само як і в разі колекторів, або за допомогою порівнюючих вимірювань, або за допомогою вимірювань на моделях. Разом з тим, вимірювання цим методом, що проводяться в непорушеному полі, на відміну від колекторного методу вільні від впливу на коефіцієнт порушення горизонтальних складових поля, вітру і т.д.

Якщо піднімати провідну кулю на висоту h над заземленою площиною в електростатичному полі напруженістю E , перпендикулярної до цієї площини, і якщо куля заземлена за допомогою досить тонкої нитки, то заряд, придбаний кулею, дорівнює добутку його потенціалу V на ємність кулі C .

Потенціал кулі буде, очевидно, дорівнювати $V = -Eh$ або, якщо поле E змінюється з висотою,

$$V = - \int_0^h E dh \quad (1.18)$$

Ємність C_h сфери радіуса r , що знаходиться на висоті h над землею, дається виразом:

$$C_h = \frac{r}{1 - \frac{r}{2h}} \quad (1.19)$$

звідки заряд Q , індукований на сфері, вміщений в рівномірне поле, дорівнює:

$$Q = \left(\frac{rh}{1 - \frac{r}{2h}} \right) E \quad (1.20)$$

У разі нерівномірного поля заряд Q дається виразом:

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q = -\frac{1}{1 - \frac{r}{2h_0}} \int_0^h E dh = -\frac{h}{1 - \frac{r}{2h}} \vec{E} \quad (1.21)$$

де \vec{E} - середня напруженість поля в шарі h .

Таким чином, вимірюючи заряд, придбаний кулею на висоті h , можна обчислити середню напруженість поля в шарі товщиною h .

1.4.2. Динамічний метод

Динамічний метод вимірювання напруженості електричного поля заснований на застосуванні електростатичних генераторів. Ці останні є окремим випадком більш загального вигляду генераторів, так званих параметричних генераторів, загальна теорія яких була розроблена Л. І. Мандельштамом і М. Д. Папалексі.

Дія електростатичного генератора базується на тому, що при внесенні в змінне електричне поле провідного тіла в останньому виникає рух індукованих зарядів. Величина струму, створюємого зарядами що переміщаються, пропорційна викликаємому його зміни поля. Ця обставина використовується для створення приладів, що вимірюють напруженість поля.

Існує багато конструкцій електростатичних генераторів, які застосовуються для цілей вимірювання поля.

Будь-яка конструкція генератора повинна перетворювати вимірюєме постійне електричне поле в змінне, що впливає на вимірювальний електрод. У всіх цих конструкціях існує елемент, за рахунок періодичного переміщення якого змінюється величина електричного поля на електроді, що сприймає поле.

Роботу електростатичного генератора зручно описати, користуючись схемою, представленої на рисунку 1.5. Ця схема дозволяє зручно проводити вимірювання електричного поля і, разом з тим, є досить типовою,

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

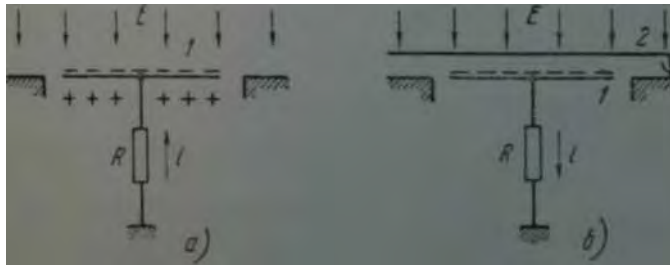


Рис.1.5 - Динамічний метод вимірювання напруженості поля.

щоб з опису її дії можна було перейти до розрахунку будь-якого іншого варіанту електростатичного генератора.

Плоска металева пластина 1 (яку аналогічно до попереднього назвемо вимірювальною пластиною) площею S_0 з'єднана з землею через опір R , вимірювальна пластина може бути експонована в поле E , нормальному до пластини (рис. 1.5, а), або ж бути закритою від нього з допомогою обертового заземленого екрану 2 (рис.1.5, б). При цьому по опорі буде текти струм.

Якщо обертання екрану здійснювати безперервно, то по опорі R буде весь час текти змінний струм i .

Позначимо через S частину площі вимірювальної пластівни, відкритої в певний момент часу t дії поля, і через C –ємність вимірювальної пластини по відношенню до землі (ця величина буде також, очевидно, змінюватися в часі). Тоді протікаючий по опорі R струм i створить падіння напруги $R_i = R \frac{dQ}{dt}$, де Q – заряд пластини. З другого боку, струм по опорі R створюється за рахунок різниці потенціалів між вимірювальною пластиною і землею.

Потенціал вимірювальної пластини в будь-якої момент часу t складається з двох частин: з потенціала який набуває металева пластина, внесена в електричне поле (цей потенціал пов'язаний з напруженістю поля E співвідношенням $V_1 = \frac{ES}{4\pi C}$), і з потенціалу V_2 який створює заряд Q , що з'явився за рахунок струму, протікаючого по опорі R на пластину. Цей потенціал дорівнює $V_2 = -\frac{Q}{C}$ Очевидно, що потенціал, створюваний зарядом Q , по знаку протилежний потенціалу, створюваному полем.

Ми можемо, відповідно, написати $V_1 - V_2 = iR$, або:

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{ES}{4\pi C} - \frac{Q}{C} = R \frac{dQ}{dt} \quad (1.22)$$

Поле також мінливе в часі: $E = E(t)$, можемо переписати рівняння 1.22:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{RC} - \frac{ES}{4\pi RC} = 0. \quad (1.23)$$

Вирішення цього рівняння дає:

$$Q = e^{-\int \frac{dt}{RC}} \left(\int \frac{ES}{4\pi RC} e^{\int \frac{dt}{RC}} dt + B \right) \quad (1.24)$$

Значення струму і можна обчислити з виразу:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (1.25)$$

Значення довільної сталої B при встановленому режимі визначається з умови ненакопичуємості заряду, тобто з умови, що зміна Q за весь цикл має дорівнювати нулю.

Рівняння (1.22), що враховує як зміну відкритої частини площі вимірювальної пластини S , так і визначення напруженості поля E і ємності C , є рівнянням, придатним для будь-якого електростатичного генератора, оскільки на зміні цих трьох елементів (або деяких з них) ґрунтується робота всіх відомих електростатичних генераторів. Рішення (1.24) в силу цього дає можливість розрахунку будь-якого електростатичного генератора, якщо задані його параметри.

Рівняння (1.24) показує також можливість застосування електростатичного генератора для вимірювання напруженості постійних електричних полів. Якщо $E = \text{const}$, то між Q і E існує лінійна залежність, та ж залежність буде, очевидно, існувати для зв'язку і з E . Ця залежність буде залишатися до тих пір, поки $E = \text{const}$, або поки за час одного циклу роботи напруженість вимірюваного поля E встигне помітно змінитися.

Рішення (1.24) вказує також на можливість вимірювання полів, мінливих під час одного циклу, але в цьому випадку залежність і від E не має вже лінійного характеру.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рішення (1.24) внаслідок його громіздкою форми важко повністю проаналізувати в загальному вигляді. Аналіз роботи електростатичного генератора зручніше провести на певній схемі, оскільки рівняння які виходять в цьому випадку дозволяють детально розглянути процеси при роботі.

Повернемося до розглянутої схеми рисунку 1.5.

Якщо відкрита частина пластини S лінійно змінюється в часі (наприклад вимірювальна пластина і екран мають форму півкіл або рівнокутних секторів і екран рівномірно обертається-випадок, зустрічається найчастіше), то C також буде лінійно змінюватися в часі. Зміни S і C в часі представлені на наступному рисунку 1.6 (криві а й б відповідно).

Щоб вирішити задачу про зв'язок і с E і з параметрами генератора, рішення рівняння (1.22) будемо вести окремо для проміжку часу, коли вимірювальна пластина відкривається, і для проміжку часу, коли вона закривається.

1) Вимірювальна пластина відкривається.

В цьому випадку можна написати:

$$S = S_0 \frac{\omega}{\pi} t \quad (1.26)$$

Де ω – кутова швидкість обертання екрана, або $S = pt$, де $p = \frac{S_0}{\pi} \omega$

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

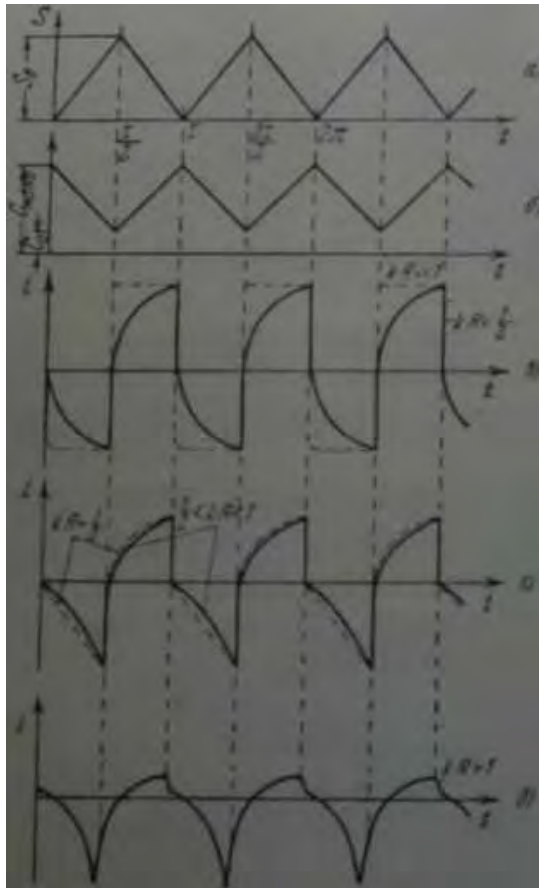


Рис.1.6 Струм і напруга на виході електростатичного генератора в залежності від періоду обертання екрануючої пластини (струмовий режим).

Ємність вимірювальної пластини змінюється при обертанні екрана від максимального значення $C_{\text{макс}}$ до мінімального C_0 і

$$C = C_{\text{макс}} - \frac{C_{\text{макс}} - C_0}{\pi} \omega t = C_{\text{макс}} - k \quad (1.27)$$

Де:

$$k = \frac{C_{\text{макс}} - C_0}{\pi} \omega \quad (1.28)$$

Повертаючись до рішення рівняння(1.24) і вважаючи $E = \text{const}$, ми отримаємо:

$$Q_0 = -\frac{E\rho}{4\pi} \left[\frac{t - RC_{\text{макс}}}{kR - 1} + B \left(1 - \frac{k}{C_{\text{макс}}} t \right)^{\frac{1}{kR}} \right] \quad (1.29)$$

де B – постійна інтегрування.

Індекс при Q_0 означає, що пластина відкривається.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значення струму і можна знайти із рівності:

$$i_0 = \frac{ES_0\omega}{4\pi^2} \left[\frac{1}{kR-1} + \frac{B}{RC_{\max}} \left(1 - \frac{k}{C_{\max}} t \right)^{\frac{1}{kR}-1} \right] \quad (1.30)$$

Розглянемо другу частину циклу.

2) Вимірювальна пластина закривається.

В цьому випадку $S = S_0 - pt$ і:

$$C = C_0 + \frac{C_{\max} - C_0}{\pi} \omega e = C_0 + k \quad (1.31)$$

Повертаючись знову до вирішення рівняння (1.24), отримаємо, вважаючи $E = const$:

$$Q_a = - \frac{Ep}{4\pi} \left[- \frac{\pi}{\omega} + \frac{t - RC_0}{kR + 1} + D \left(1 + \frac{k}{C_0} t \right)^{-\frac{1}{kR}-1} \right] \quad (1.32)$$

при чому індекс Q_a означає, що пластина закривається. Для струму i_a знайдемо:

$$i_a = \frac{ES\omega}{4\pi^2} \left[\frac{1}{kR+1} - \frac{D}{RC_0} \left(1 + \frac{k}{C_0} t \right)^{-\frac{1}{kR}-1} \right] \quad (1.33)$$

де D - постійна інтегрування.

Значення постійних B і D можна обчислити з наступних умов: 1) заряд пластини є неперервною функцією часу; 2) заряди на початку одного напівциклу і в кінці іншого рівні між собою; 3) не відбувається накопичення заряду за весь цикл.

Для спрощення отриманих виразів введемо деякі додаткові позначення: позначимо період процесу через $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$; тимчасову постійну схеми в момент повного екранування пластини через $\tau_{\max} = RC_{\max}$ і тимчасову постійну схеми в момент повного експонування пластини через $\tau_0 = RC_0$. Тоді вираз для постійних набуває наступного вигляду:

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B = \frac{2\tau_{\max} - 2\tau_0 \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{1}{kR}}}{[4(\tau_{\max} - \tau_0)^2 - \tau^2] \left[1 - \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{2}{kR}}\right]} \tau^2, \quad (1.34)$$

$$D = \frac{2\tau_{\max} \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{1}{kR}} - 2\tau_0}{[4(\tau_{\max} - \tau_0)^2 - \tau^2] \left[1 - \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{2}{kR}}\right]} \tau^2, \quad (1.35)$$

Незважаючи на деяку громіздкість коефіцієнтів, можна провести повний розрахунок залежності і від Е, знаючи параметри схеми, або ж можна визначити необхідні параметри схеми по встановленим параметрам і при заданому Е. Підставляючи значення В і D з рівнянь (1.34) і (1.35) в рівняння (1.30) і (1.33) відповідно, отримуємо рівняння:

$$i_0 = \frac{ES\omega}{4\pi^2(kR - 1)} * \left\{ 1 - 2 \frac{1 - \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{1}{kR}+1}}{(kR + 1) \left[1 - \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{2}{kR}}\right]} \left(1 - \frac{k}{C_{\max}} t\right)^{\frac{1}{kR}-1} \right\} \quad (1.36)$$

$$i_0 = \frac{ES\omega}{4\pi^2(kR + 1)} * \left\{ 1 - 2 \frac{\left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{1}{kR}-1} - 1}{(kR - 1) \left[1 - \left(\frac{C_0}{C_{\max}}\right)^{\frac{2}{kR}}\right]} \left(1 + \frac{k}{C_0} t\right)^{-\frac{1}{kR}-1} \right\} \quad (1.37)$$

Слід звернути особливу увагу на параметр:

$$kR = \frac{C_{\max} - C_0}{\pi} \omega R, \quad (1.38)$$

або в введених позначеннях:

$$kR = 2 \frac{\tau_{\max} - \tau_0}{\tau}. \quad (1.39)$$

Величина kR показує відношення зміни часової постійної схеми до часу одного напівциклу. Залежно від величини цього параметра змінюється характер залежності $i = f(i)$. На рисунку 1.6, в і г залежність $i = f(t)$ представлена графічно для $kR < 1$.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

У цьому випадку струм під час відкривання пластини може бути виражений рівнянням виду:

$$i_0 = -|\alpha| + |\delta| \left(1 + \frac{k}{C_{\text{макс}}} t\right)^{\frac{1}{kR}-1}, \quad (1.40)$$

а під час закривання:

$$i_a = |\beta| - \frac{|x|}{\left(1 + \frac{k}{C_0} t\right)^{\frac{1}{kR}+1}} \quad (1.41)$$

Поки $kR < \frac{1}{2}$, величини i_0 і i_a мають вигляд, подібний представленому на рисунку 1.6, в, причому з зменшенням kR , коли період обертання стає набагато більше зміни тимчасової постійної схеми, форма i_0 і i_a наближається до прямокутної (на рисунку показано пунктирною лінією); при цьому амплітудне значення напруги на виході генератора падає.

Якщо $\frac{1}{2} < kR < 1$, то форма i_0 змінюється, як показано на рисунку 1.6, г, переходячи через лінійну залежність при $kR = \frac{1}{2}$ (на рисунку показано пунктирною лінією). При $kR = \frac{1}{2}$ спадання потенціалу внаслідок стікання заряду і зростання його внаслідок зменшення ємності системи призводять до лінійної залежності струму від часу. При $kR = \frac{1}{2}$ рівняння кривої струму при відкриванні пластини набуває вигляду:

$$i_0 = |\alpha| - \frac{|x|}{\left(1 + \frac{k}{C_{\text{макс}}} t\right)^{1-\frac{1}{kR}}} \quad (1.42)$$

При закриванні пластини, рівняння кривої струму зберігає вид, що дається рівнянням 1.41. Форма кривої струму в цьому випадку представлена на рисунку 1.6, д. Видно зрушення струму по фазі: крім того, внаслідок великої тимчасової постійної схеми заряд не встигає повністю стікати, що призводить до зменшення струму, що тече по опорі.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Як видно з наведених рівняннi i малюнкiв, збiльшення числа оборотiв призводить до зростання ефективного значення струму тiльки поки $kR < \frac{1}{2}$. Це вiдношення обмежує можливiсть пiдвищення чутливостi схеми за рахунок збiльшення числа оборотiв.

Змiна знака вимiрюваного поля змiнює в усiх випадках напрямок протiкання струмiв на протилежне.

Розглянемо ще один варiант використання електростатичного генератора, в якому величина поля визначається за допомогою вимiрювання потенцiалу вимiрювальної пластини, причому величина kR дуже велика (R дуже велике) i $R \gg \frac{1}{\omega C_0}$. У цьому випадку на вимiрювальнiй пластинi можуть перебувати тiльки iндукованi заряди.

Потенцiал пластини V тодi можна знайти з рiвняння:

$$V = \frac{ES}{4\pi C} \quad (1.43)$$

Змiнi S i C (рис. 1.7, а i б) вiдповiдає залежнiсть потенцiалу пластини вiд часу представлена на рис. 1.7, в i г. На рисунку 1.7, в, показано змiна потенцiалу при $C \rightarrow 0$, а на рисунку 1.7, в i г, зображений випадковий, коли $\frac{C_{\text{макс}} - C_0}{C_{\text{макс}}} \rightarrow 0$. Як видно з рисункiв, для збiльшення чутливостi схеми вигiдно брати C_0 можливо меншим, але це призводить до вимоги надзвичайно малої iнерцiйностi вимiрювального приладу, оскiльки основне зростання потенцiалу припадає на малу частину часу циклу. Збiльшення C_0 робить наростання потенцiалу бiльш плавним, але зате знижує амплiтудне значення потенцiалу.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Пiдпис	Дата		

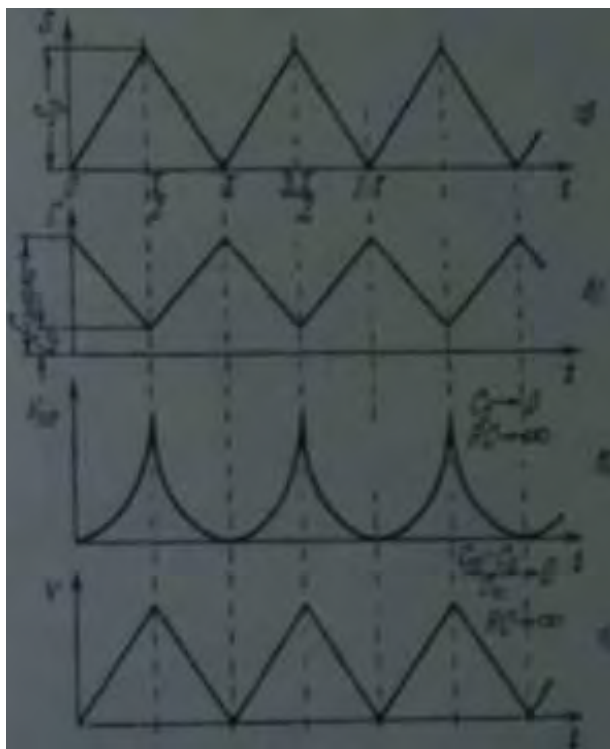


Рис. 1.7 - Напряга на виході електростатичного генератора в залежності від періоду обертання екрануючої пластини (зарядний режим).

Хороші результати дає вимір напруги на пластині за допомогою електрометричної лампи, причому вимірюють напруги на анодній нагрузки цієї лампи за допомогою катодного осцилографа. Таким чином, вдається поєднувати малу початкову ємність і безінерційний вимір амплітуди напруги. Ця схема дозволяє значно знизити межу вимірюваних напруженостей поля.

Прилад для вимірювання заряду окремих частинок, заснований на цьому методі, в зв'язку з вимірюванням величини зарядів частинок в атмосфері.

Порівнюючи чисто струмовий режим, коли заряд вимірювальної пластини за час циклу встигає повністю стікати ($R \ll \frac{1}{\omega C_0}$), і режим напруги, коли на вимірювальній пластині є тільки індукований заряд ($R \gg \frac{1}{\omega C_0}$), можна встановити наступне (рисунок 1.6 і 1.7).

Перехід від токового режиму до режиму напруги супроводжується зрушенням фази напруги на виході генератора на 90° .

Далі, при роботі в струмовому режимі на виході генератора виходить змінний струм; зміна знака вимірюємого поля зрушує фазу цього струму на 180° . При роботі ж в режимі напруги на виході генератора виходить постійна пульсуюча напруга; вимірювання знака вимірюваного поля змінює знак цієї напруги.

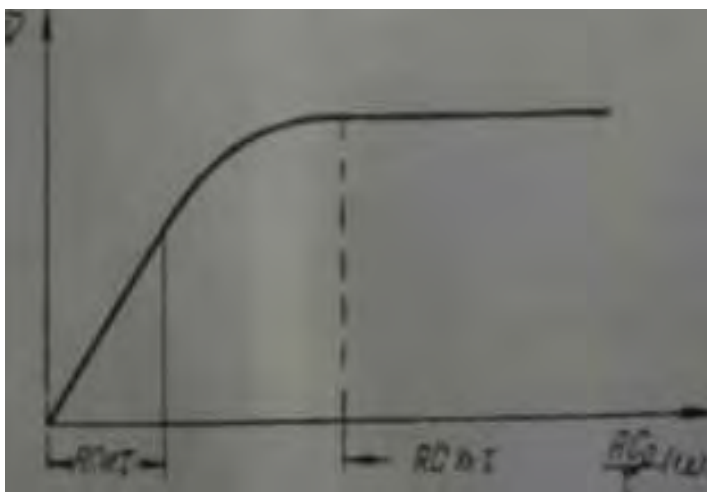


Рис. 1.8. - Залежність середньої напруги V на виході електростатичного генератора від відношення часової постійної RC схеми до періоду обертання екрану t .

Повертаючись до вимірювань напруженості поля за величиною струму, поточного з пластини, або по її потенціалу, слід зазначити, що майже всі прилади, побудовані за цим принципом, вимірюючи не миттєве значення струмів або потенціалів, а величину середнього струму, поточного по опорі R , або середнє значення потенціалу пластини. Цей середній струм (або потенціал) або вимірюється безпосередньо приладом після попереднього випрямлення (оскільки безпосереднє вимірювання малих змінних струмів або напруг ускладнене), або цей струм (або потенціал) посилюється і випрямляється ламповою схемою, а потім вимірюється.

Починаючи від тих значень RC_0 коли за час t на пластину не встигають натекти заряди, амплітуда і середнє значення потенціалу на пластинках вже практично не залежать від величини τ . На рисунку 1.8 дана залежність середньої напруги V на виході генератора від швидкості обертання екрану ω . В тих випадках коли мотор, що обертає екран, не може підтримувати постійне

число обертів, для підвищення точності вимірювання генератор змушують працювати в області $RC_0 \gg \tau$.

Розглядаючи рівняння (1.36) (1.37) (1.43), приходимо до наступних висновків про використання електростатичного генератора в якості вимірювального приладу.

1) При вимірах напруженості поля по амплітудним значенням напруги треба прагнути до значень $kR \gg 1$ за рахунок збільшення R при мінімальному C_0 . В цьому випадку необхідно ставити на виході генератора безінерційний вимірювальний прилад.

2) Для вимірювань поля за середнім струмом, протікаючому з вимірювальної пластини, щоб апарат знаходився в області значень $kR < \frac{1}{2}$ при $RC_0 \ll \tau$.

3) Застосування електростатичного генератора в поєднанні з ламповим підсилювачем призводить до потреби в максимальній потужності на виході генератора. У цьому випадку апарат знаходився в області $1 > kR > \frac{1}{2}$. Вибираючи в якості першої лампи підсилювача лампу з малими сітковими струмами, можна, щоб виключити вплив частоти обертання екрану, працювати в області:

$$RC_0 = 5 \div 10\tau. \quad (1.44)$$

Для $kR \ll 1$ і $RC_0 \ll C$ х в рівняннях(1.30) і (1.33) можна знехтувати другим членом в дужках, де враховується вплив мінливої ємності. Рівняння(1.30) і (1.33) можна в цьому випадку представити одним рівнянням:

$$i = \pm \frac{ES_0\omega}{4\pi^2} \quad (1.45)$$

причому першу половину циклу струм тече в одному напрямлені, а другу половину - в іншому (рис.1.5, в).

Слід зазначити, що у випадках, коли бажано виміряти не тільки величину, а й знак напруженості, в прилад часто вводять спеціальний

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристрій, синхронізуючий з екраном, що дозволяє визначити фазу струму або напруги і тим самим і напрямок поля.

В електростатичному генераторі енергія, що виділяється на опорі R, поставляється роботою механічних сил, витрачених на переміщення екрану, без витрати енергії електричного поля. Остання обставина є головною перевагою методу електростатичних генераторів, дозволяючи оперувати при вимірюванні струмами і потужностями, значно вищими, ніж при інших методах вимірювання.

Однак струми, що виходять на виході електростатичного генератора, виявляються достатніми для безпосереднього вимірювання чуттєвим гальванометром тільки в порівняно великих полях, причому в схему необхідно включити випрямний пристрій. Так як всі лампові і напівпровідникові випрямлячі погано працюють при малих напругах, часто вдаються до механічних випрямлячів; проте це дуже ускладнює схему, а надійність роботи механічних випрямлячів зазвичай недостатня.

Якщо потрібно вимірювати малі напруженості електричного поля і бажано обійтися без надмірно чуттєвих гальванометрів на виході, в прилад доводиться вводити лампову підсилювальну схему. Наявність змінної напруги на виході генератора надто полегшує посилення і дозволяє отримати досить високе відношення сигналу до шуму.

Другим фактором, що збільшує відношення сигналу до шуму, є можливість працювати з вхідними опором порядку $10^3 - 10^4$ ом (замість опору, що перевищують $10^{13} - 10^{14}$ ом, звичайних в електрометричних схемах для вимірювання напруженості поля); це дозволяє значно знизити вплив наведень. Низькі вхідні опори також надзвичайно зменшують вплив дефектів ізоляції на роботу приладу.

Потужність, що дається електростатичним генератором, виявляється достатньою для того, щоб вимірювати поля напруженістю до $0,001$ e/cm за допомогою підсилювачів на звичайних серійних радіолампах, що працюють в звичайних режимах.

					<i>ПК6102.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, використовуючи схему електростатичного генератора з підсилювачем, можна вимірювати дуже малі напруженості електричного поля. При правильному виборі схеми вдається довести інерцію цих приладів до тисячних часток секунди.

					<i>ПК6102.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

2. Розробка приладу

2.1. Схема та принцип роботи приладу

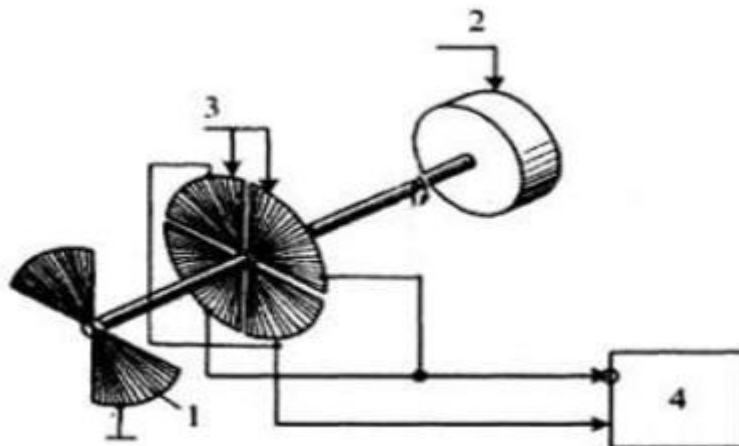


Рис.2.1 - Блок схема вимірювального перетворювача динамічного(ротаційного) типу

Пластина 1, що заземлена на корпус, поперемінно екранує і експонує дві пари вимірювальних пластин 3, які підключених до входів підсилювача 4 і відповідно до цього в пластинах змінюється індукований заряд, який 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. 2.1 струм змінить свій напрямок 4 рази. Звідси можемо зробити висновок, що розглянутий на рис. 2.1 динамічний(ротаційний) спосіб вимірювання дозволяє виконувати один повноцінне вимір напруженості електричного поля за час, що не перевищує половини періоду обертання двигуна, що в декілька порядків може перевищувати час вимірювань статичними методами.

Тому виходячи з вищесказаного вищесказане, (а саме про високу швидкодію вимірювань, та високу чутливість) для реалізації поставлених вимог для вимірювача напруженості електричних полів доцільно використовувати динамічний(ротаційний) метод вимірювання.

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

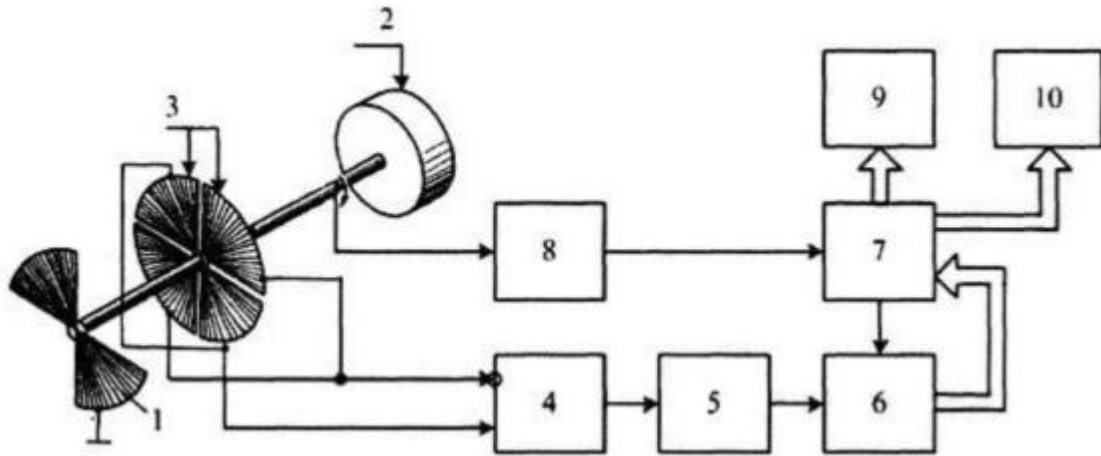


Рис.2.2 – Функціональна схема вимірювача напруженості електростатичного поля:

1 – модулятор; 2 – електродвигун; 3 – вимірювальні пластини;
 4 – підсилювач; 5 – фільтр; 6 – АЦП; 7 – мікроконтролер; 8 – датчик синхронізації положення пластин; 9 – дисплей; 10 – модуль безпроводної передачі сигналу.

2.2. Вибір мікроконтролера

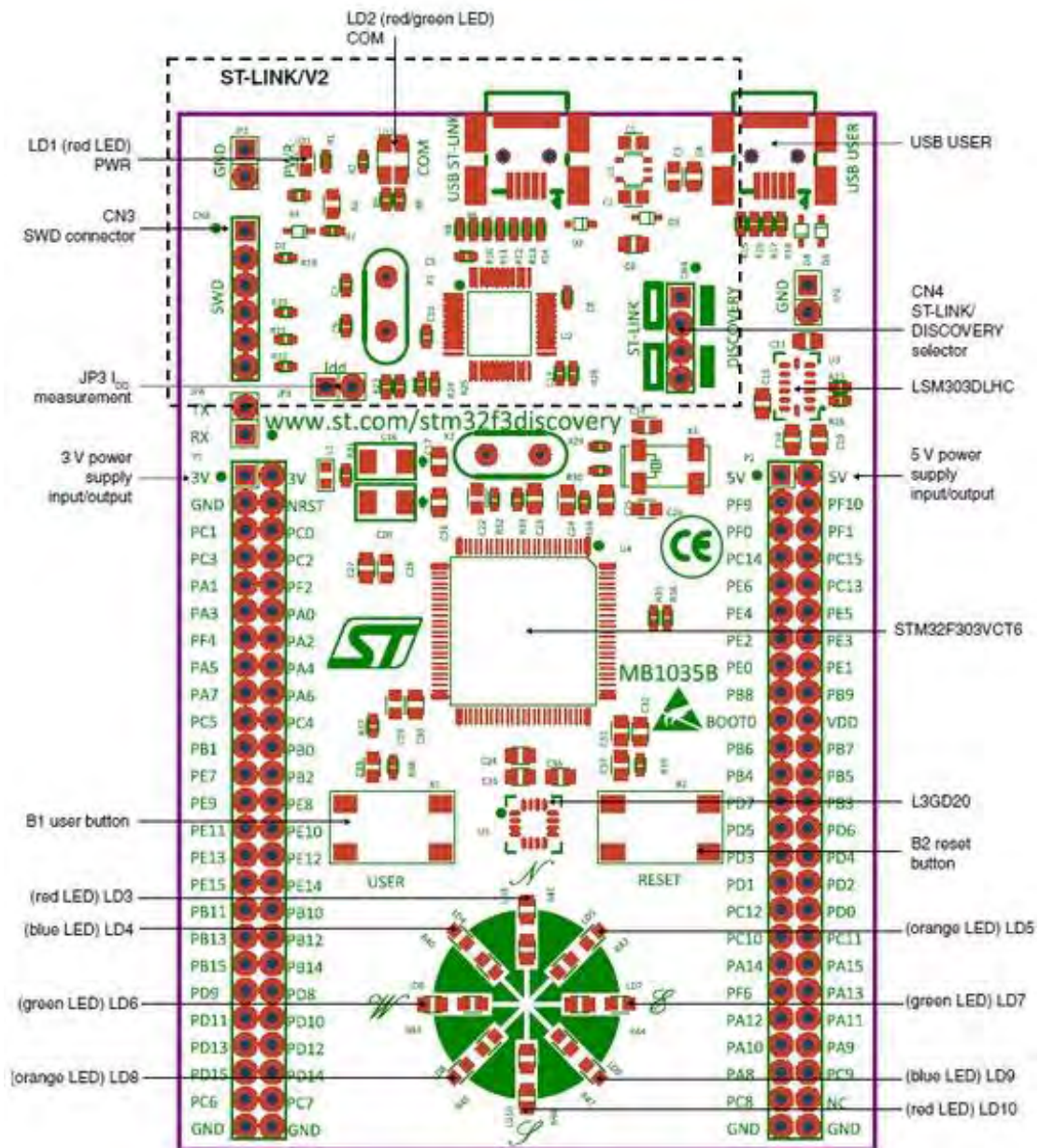


Рис.2.3 – Плата розробника STM32F3 DISCOVERY

Особливості STM32F3DISCOVERY:

- Встановлений мікроконтролер STM32F303VCT6
- Вбудований емулятор ST-LINK / V2 (з SWD роз'ємом для програмування і налагодження);
- MEMS датчик цифрової гіроскоп L3GD20;
- MEMS система на кристалі акселерометр і компас LSM303DLHC;
- Десять світлодіодів;
- Дві кнопки: призначена для користувача і скидання;

									Арк.
									38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ПК6102.0000.000 ПЗ				

- Бічні роз'єми з кроком 2,54 мм для підключення зовнішніх пристроїв;
- Призначений для користувача роз'єм USB Mini-B.

В данному проєкті буде використовуватись плата розробника STM32F3 Discovery на базі мікроконтролера STM32F303VCT6, так як це плата являється зручною для розробки систем, і в подальшому, коли буде проводитись створення плати для серійних приладів то дану плату можливо буде замінити на будь-який мікроконтролер серії STM32F3, підбравши його по кількості використаних ніг, а також пам'яті. Також всі виводи з плати розробника є прямими виводами з мікроконтролера, що теж полегшить розведення плати для серійних приладів. Ще одним з плюсів данної плати є те що на ній вбудований програматор ST-Link/V2, що дозволить в майбутньому програмувати мікроконтролери для печатних плат.

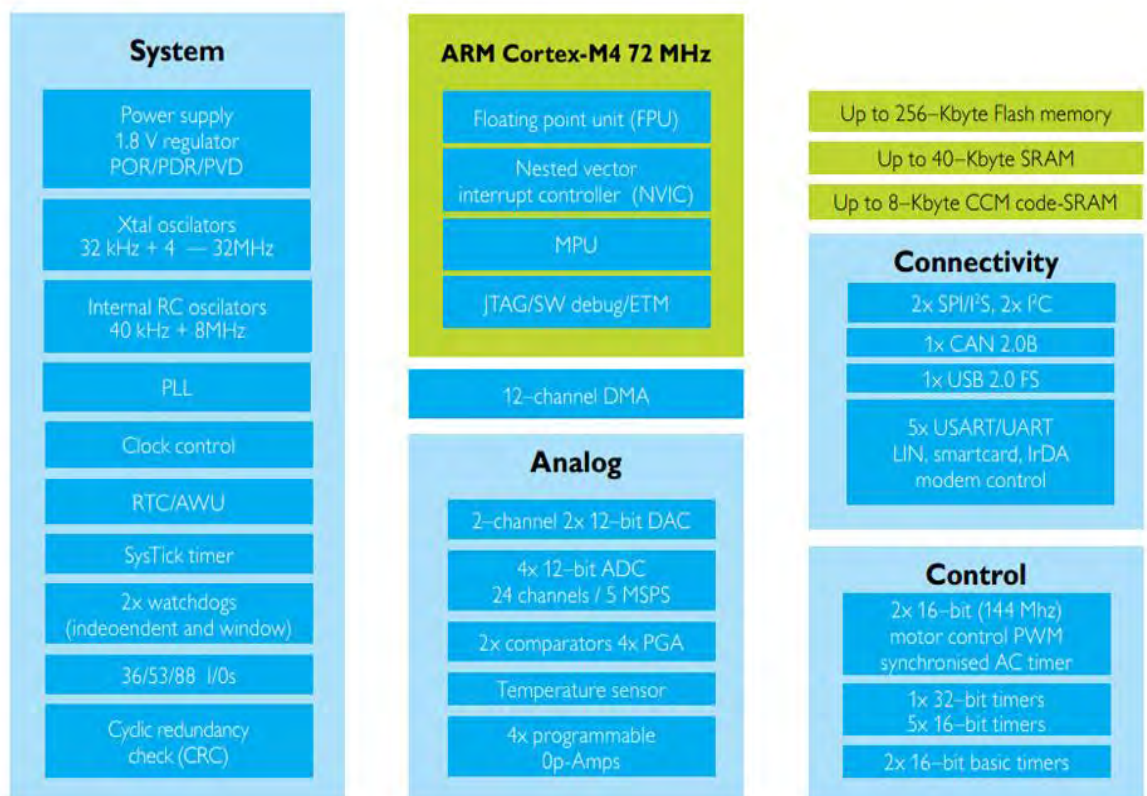


Рис.2.4 – Блок схема мікроконтролерів сімейства STM32F3

Переваги мікроконтролерів серії STM32F3:

- високопродуктивне ядро Cortex-M4 з DSP і FPU;
- низька ціна;

						ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			39

- вбудований вимірювальний сигма-дельта АЦП;
- захист від збоїв пам'яті;
- розвинена цифрова та аналогова периферія.

Характеристика мікроконтролера STM32F303VCT6:

- Корпус: LQFP-100;
- Ядро: ARM Cortex-M4;
- Максимальна частота ядра: 72 МГц;
- Об'єм пам'яті програм: 256 кбайт;
- Тип пам'яті програм: FLASH;
- Об'єм оперативної пам'яті: 40 кбайт;
- Кількість входів / виходів: 87;
- Інтерфейси: Can, I2C, IrDA, LIN, SPI, UART / USART;
- Периферія: DMA, I2S, PWM, POR, WDT;
- АЦП / ЦАП: А / D 4x12b; D / А 2x12b;
- Напруга живлення: 2 ... 3.6 В;
- Робоча температура : -40 ... 85 С.

2.3. Підбір двигуна

В даній роботі потрібно обирати економічний двигун, щоб він міг працювати тривалий час, і був компактний. З цих міркувань був обраний мікро-електронний двигун RF-300CA-09550.

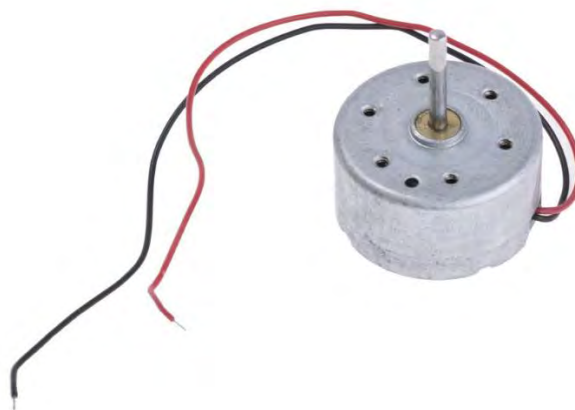


Рис.2.5 - двигун RF-300CA-09550

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Даний двигун в режимі без навантаження обертається зі швидкістю – 2700 обертів на хвилину, та споживає струм - 12 мА, а в режимі навантаження обертається зі швидкістю – 2100 обертів на хвилину, та споживає - 41 мА, необхідне напруження – 3В. Дані характеристики дають нам змогу підключити двигун напряму до виходів мікроконтролера без використання драйверу, так як виходи мікроконтролера видають до 50 мА, а двигуну в режимі навантаження потрібно 42 мА. Тип двигуна колекторний, що дає нам змогу регулювати його швидкість, змінною напруги.

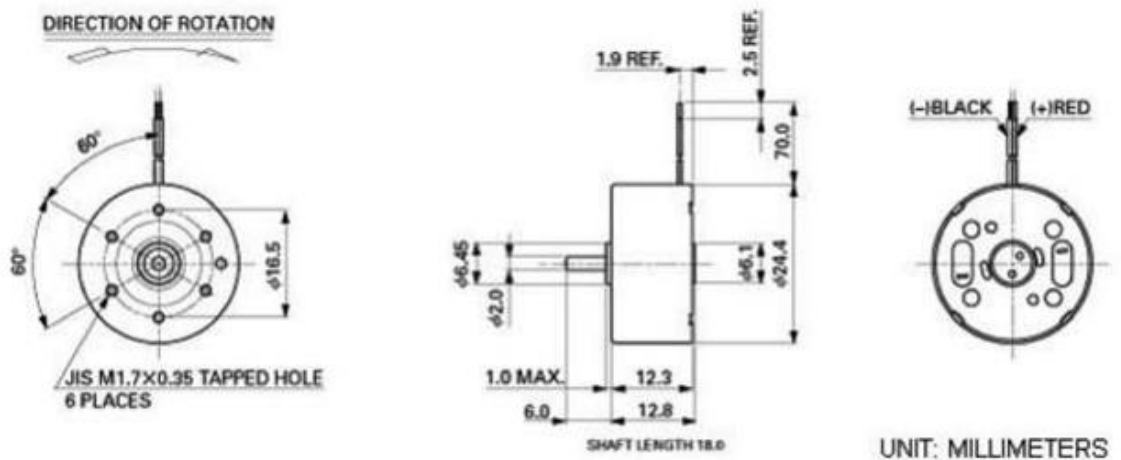


Рис.2.6 – Розміри двигуна RF-300CA-09550

2.4. Вибір датчика синхронізації положення пластин

В даному приборі датчик синхронізації положення пластин, потрібний для фіксації положення екрануючої пластини, щоб визначати полярність напруженості. Алгоритм розрахунку моментів запуску АЦП впливає з аналізу графіків форми сигналу на виході вимірювального перетворювача рис. 5, а також аналітичних виразів їх описують:

$$U_1 = \frac{2\varepsilon E_0 S_0 R}{T\left(1 - \frac{2RC_m''}{T}\right)} \left\{ 1 + \frac{2}{1 + \frac{2RC_m''}{T}} \times \frac{\left[1 + \frac{C_m''}{C'}\left(1 - \frac{2t}{T}\right)\right]^{-\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} \times \left[\left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{-\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} - 1\right]}{\left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{-\left(1 - \frac{T}{2RC_m''}\right)} - \left(1 + \frac{C_m''}{C'}\right)^{-\left(1 + \frac{T}{2RC_m''}\right)}} \right\} \quad (2.1)$$

При $\frac{T}{2RC_m''} = 1$ отримано:

						ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			41

$$U'_1 = \frac{\varepsilon E_0 S_0}{2C''_m} \left\{ \frac{2 \ln(1 + \frac{C''_m}{C'})}{1 - (1 + \frac{C''_m}{C'})^{-2}} - 2 \ln \left[1 + \frac{C''_m}{C'} \left(1 - \frac{2t}{T} \right) \right] - 1 \right\} \quad (2.2)$$

где $\frac{2t}{T} = \nu$; $\frac{T}{2RC_m} = \rho$; $\frac{C''_m}{C'} = m$

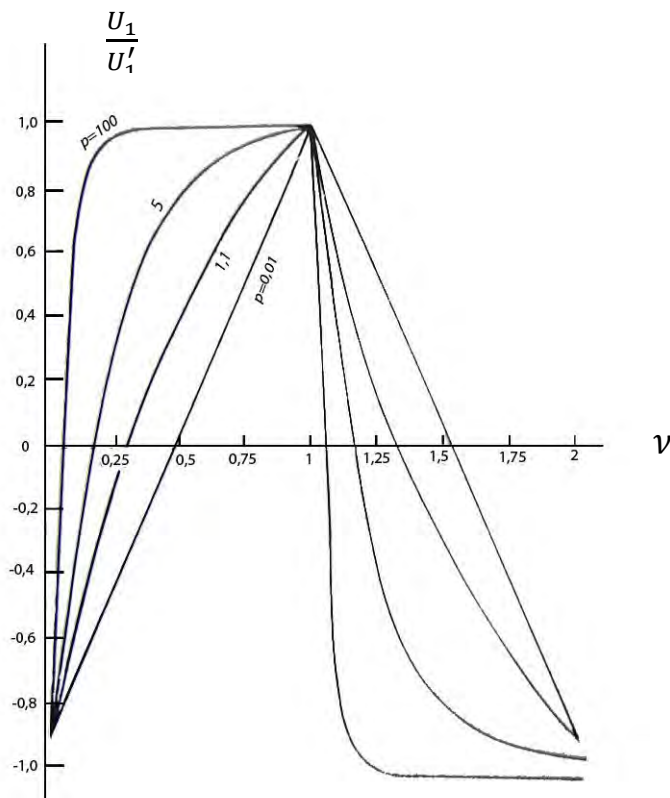


Рис.2.7- графіки напруги при різних періодах обертів двигуна

З наведених на рис.2.7 нормованих по осі X і по осі Y графіків і аналітичних виразів, що описують роботу вимірювального перетворювача, що реалізує ротаційний спосіб, що враховують не тільки струми індукції, що наводяться зарядами пластин але і конвекційні (іонні струми) в атмосфері, можна помітити, що збільшення амплітуди сигналу перетворювача і зменшення часу вимірювання пропорційні частоті обертання $1/T$ екрануючої пластини. Однак, як впливає з наведених графіків, напруга, що знімається з вимірювальних пластин, при зменшенні періоду обертання приймає складну форму (див. Рис.2.7 крива при $\rho = 0.01$), тому за доцільне брати вибірки (запускати АЦП) сигналу тільки в районі позитивних і негативних піків сигналу, а амплітуду сигналу розраховувати як різницю усереднених значень цих піків. Це дозволяє істотно збільшити коефіцієнт перетворення

вимірюваного параметра, зменшити вимоги до алгоритмів фільтрації сигналу, зменшити обсяг використовуваної оперативної пам'яті, крім того розрахунок амплітуди вихідного сигналу як різниці позитивних та негативних піків суттєво знижує вимоги до дрейфу операційного підсилювача.

Для даної задачі найкраще підходять магнітні енкодери, так як вони більш точніші при високій швидкості двигуна. Їх робота базується на використанні датчиків Холла і постійного магніта.



Рис.2.8 – модуль магнітного енкодера від компанії Pololu

Мною був вибраний модуль магнітного енкодера від компанії Pololu, так як він дешевий та простий в встановленні та використанні. На ньому встановленні два датчика Холла, кут між якими 90 градусів. Але він комплектується шести полюсним магнітом, що дозволяє визначити 12 положень вала, що занадто багато для нашого приладу, тому даний магніт можна замінити на магніт з такими самими характеристиками, але двох полюсний, що в комплексі з двома датчиками Холла, дасть нам можливість визначати чотири положення валу. Наприклад, коли пластини модулятора будуть знаходитись в першій чверті, то перший датчик Холла буде видавати високий рівень сигналу, коли пластини повернуться на 90 градусів, то ввімкнеться другий датчик Холла, і теж буде видавати високий рівень сигналу, після наступного повороту на 90 градусів, перший датчик Холла, перестане подавати високий рівень сигналу, і при останньому повороті на чверть, обидва

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

датчика Холла будуть видавати низький рівень сигналу.

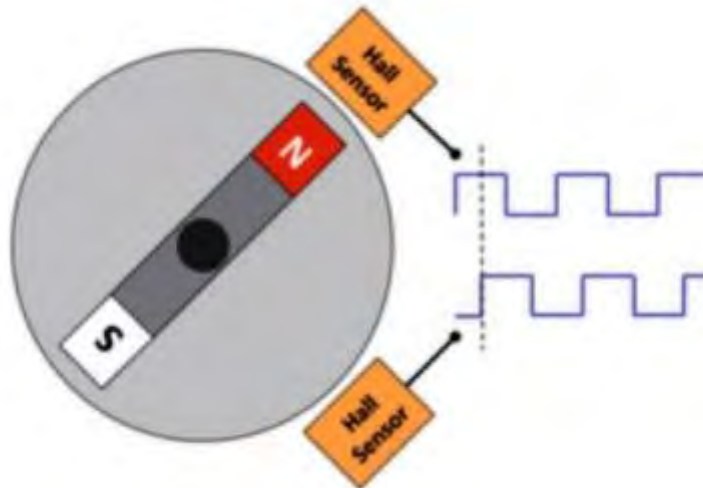


Рис.2.9 – Схема роботи енкодера

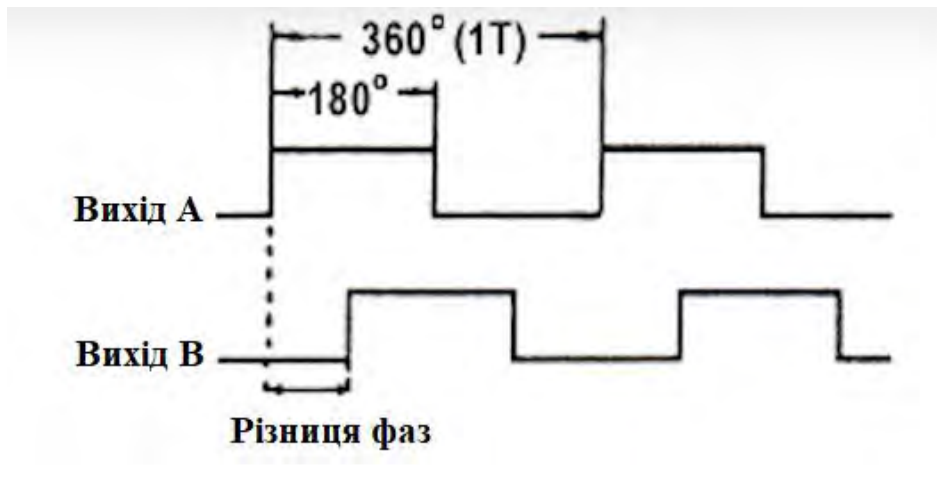


Рис.2.10 – Сигнали на виході енкодера

Також якщо помножити на два, час спрацьовування одного з датчиків Холла ми зможемо дізнатись період обертання валу, таким чином ми зможемо робити поправку, підставляючи в формулу для розрахунку напруженості з прийнятої напруги, період не як константу, а як змінну, значення якої ми будемо отримувати з данного енкодера, а також зможемо відразу корегувати частоту обертання двигуна, щоб вона знаходилась на вибраному оптимальному рівні, що зробить наш прилад більш точнішим.

Висновок

В даній роботі були розглянуті методи виміру напруженості електростатичного поля атмосфери, які існують на даний момент, а також від чого може залежити, і для чого можна застосовувати дані вимірювання.

А також розроблений прилад для вимірювання напруженості електростатичного поля атмосфери, оснований на ротаційному методі.

					<i>ПК6102.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

- [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]. Бирюков С. В. Физические основы измерения параметров электрических полей/ Бирюков С.В Омск СибАДИ 2008 -112с.
- [7]. 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
- [8]. 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
- [9]. В. С. Аксельрод, В. А. Мондрусов, К. Б. Щигловский, Методы и средства измерения напряженности и потенциала электрического поля

					ПК6102.0000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

[10]. 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

[11]. 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
Опубліковано 23.09.1989 Бюл. №35

					<i>ПК6102.0000.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Додатки

Технічне завдання

1. Найменування приладу.

„Прилад для вимірювання електростатичного поля”.

2. Мета виконання дипломного проєкту та призначення приладу.

Розробка приладу для вимірювання електростатичного поля

3. Передумови для розробки приладу.

Дана розробка виконується відповідно до тематики дипломного проєктування, 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 ± 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 ДСТУ 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.