

УДК 621.3.082.72

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ*Баженов В. Г., Повшенко О. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: scela2472@gmail.com*

Вимірювання напруженості електричного поля атмосфери на сьогодні стало розповсюдженою задачею сучасної метеорології. Адже розподіл напруженості локального електричного поля поблизу поверхні Землі тісно пов'язаний з глобальним розподілом гроз і електрифікованих хмар. Силовою характеристикою електричного поля є його напруженість. Зміна атмосферного електричного поля відбувається відносно повільно, тому для вимірювання напруженості електричного поля найбільш широко використовуються електростатичні флюксметри (ЕФ).

Електростатичні флюксметри знайшли своє застосування для моніторингу електричного поля за гарної погоди, вимірювання вертикального електричного поля всередині хмар та спостереження за рухом і еволюцією штурмів. Були розроблені та задокументовані різні конструкції електростатичних флюксметрів протягом більш ніж століття, але оскільки дана тематика не є популярною, їх методи побудови та особливості розрахунків не задокументовані. Тому, постала необхідність в узагальненні будови приладу та розрахунку його метрологічних характеристик.

Робота направлена на підвищення точності вимірювання та вдосконалення апаратного забезпечення електростатичних флюксметрів. Задача підвищення точності вимірювання електростатичного поля напряму залежить від зменшення похибок, які виникають в приладі. До причин цих похибок можна віднести як недосконалість методу вимірювання або невідповідність об'єкта вимірювання його моделі, так само, як і властивості засобів вимірювання. У попередніх дослідженнях авторами було використано математичну модель сенсору ЕФ, яка не відповідає реальній формі сигналу, що створило необхідність в її вдосконаленні.

В даній роботі авторами було запропоновано та обґрунтовано універсальну математичну модель сенсору ЕФ. Також в роботі приведено аналіз складових запропонованої математичної моделі, який дозволить підібрати оптимальні параметри будови сенсору ЕФ, що підвищить його чутливість. Додатково у роботі було запропоновано власну функціональну схему ЕФ та розроблено методологію розрахунку її інструментальної похибки, що дозволяє виділити критичні параметри під час вибору комплектуючих для побудови приладу.

Розглянуті аспекти в цій статті обґрунтовують актуальність підвищення точності вимірювання напруженості електростатичного поля. Проведена робота є початком досліджень, направлених на вдосконалення апаратного забезпечення електростатичних флюксметрів.

Ключові слова: *вимірювання; електростатичне поле; електростатичний флюксметр; похибки вимірювання.*

Вступ

Електричне поле поблизу поверхні Землі за відсутності електрифікованих хмар підтримується глобальним електричним ланцюгом (ГЕЛ) [1 - 4], створюючи приземне електричне поле. Силовою характеристикою електричного поля є його напруженість, яка вимірюється в одиницях В/м. За гарної погоди напруженість приземного електричного поля складає приблизно 100 В/м. За наявності електрифікованих хмар, на приповерхневому електричному полі сильно впливають області заряду хмари та нейтралізація зарядів блискавкою. За таких умов величина напруженості приповерхневого електричного поля може стрімко зрости від кількох одиниць до сотень кВ/м.

Відомо, що сигнал ГЕЛ на поверхні корелюється з глобальним розподілом гроз і електрифікованих хмар, підтверджуючи широко поширену

думку про те, що грози є основним джерелом енергії для ГЕЛ [1, 4 - 7]. Починаючи з середини 19 століття, приповерхневий сигнал ГЕЛ досліджували над океанами, де планетарний прикордонний шар відносно вільний від забруднення. Локальні збурення сигналу ГЕЛ, особливо в межах прикордонного шару, були обговорені та задокументовані в роботах [2, 8, 9], а його добова зміна відома як крива Карнегі [10].

У сучасній метеорології задача вимірювання напруженості електричного поля атмосфери широко розповсюджена.

Вимірювання локального електричного поля використовується для визначення динамічного розподілу заряду в грозових хмарах і для кращого розуміння електризації грозових хмар [11 - 15]. Для вивчення квазістатичного атмосферного електричного поля в науках про атмосферу найбільш широ-

ко використовуються електростатичні флюксометри (ЕФ).

Електростатичний флюксометр (або ще відомий як electrostatic field mill (EFM)) - це електрометр змінної ємності, тобто він вимірює локальне навколишнє електричне поле на місці через заряд, накопичений на поверхні вимірювальної пластини.

Конструктивні особливості приладу обумовлюються сферою його застосування. Спеціальні конструкції ЕФ дозволяють проводити вимірювання напруженості електростатичного поля на відстані від земної поверхні, за допомогою встановлення його на літаки [16], повітряні кулі [17] та ракети [18]. Різні конструкції ЕФ були розроблені та задокументовані протягом більш ніж століття [16, 19 - 25]. Використання ЕФ також знайшло своє застосування в системах попередження про небезпеку блискавки для захисту матеріальних активів та для забезпечення безпеки в аеропортах, на полях для гольфу, на об'єктах радіопередачі тощо [26 - 28]. Незалежно від сфери застосування, підвищення точності вимірювання та вдосконалення апаратного забезпечення ЕФ є актуальною задачею метрології.

Кількісною оцінкою точності вимірювання є похибка вимірювання. Основними джерелами виникнення похибок вимірювання являються методична та інструментальна складові. До причин виникнення методичної похибки вимірювання відносять недосконалість методу вимірювання або невідповідність об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання. В свою чергу, виникнення інструментальної похибки обумовлено властивостями засобів вимірювання.

У попередній роботі [29] авторами було використано математичну модель сенсору ЕФ запропонованого та обґрунтованого у роботі [30]. Під час експериментальних досліджень було встановлено невідповідність математичної моделі сигналу, реальній формі сигналу отриманого безпосередньо з сенсору, що створило необхідність у вдосконаленні математичної моделі сенсору ЕФ.

В результаті аналізу сучасних літературних джерел було виділено декілька математичних моделей сенсору ЕФ, з різними підходами до їх виведення. Приведені у роботах [31, 32] математичні моделі описують окремі випадки будови сенсорів, але не є універсальними. Тому в даній роботі авторами було запропоновано та обґрунтовано універсальну математичну модель сенсору ЕФ. Також в роботі приведено аналіз складових запропонованої математичної моделі, який дозволить підібрати оптимальні параметри будови сенсору ЕФ, що підвищить його чутливість.

При спробі оцінити ефективність засобів вимірювання ЕФ, авторами додатково було розглянуто та проаналізовано патенти та роботи, які описують їх принцип побудови та функціонування [33 - 35]. Основним недоліком представлених робіт

було те, що в жодній з них не приведено чисельних значень інструментальної похибки, так само, як і методологію її розрахунку. Для того, щоб окремо не розраховувати інструментальну похибку для кожної варіації побудови ЕФ, у роботі було запропоновано власну функціональну схему (ФС) ЕФ, яка враховує їх найкращі рішення. Для побудованої ФС було розроблено методологію розрахунку інструментальної похибки, яка дозволяє виділити критичні параметри під час вибору комплектуючих для побудови приладу. Знаючи відповідні характеристики елементної бази, можна чисельно оцінити значення інструментальної похибки ЕФ.

Принцип роботи електростатичного флюксометра

Електростатичний флюксометр працює шляхом переміщення заземленої екрануючої пластини над сенсорними пластинами електродів, по черзі піддаючи сенсорні пластини дії електричного поля, а потім екрануючи їх. Це чергування може бути безперервним, з використанням заземленого ротора, що обертається з кутовою частотою ω , або через рух екрануючої пластини вперед і назад [31]. Узагальнений вигляд сенсорної пластини, що складається з 6 секторів, поєднаних у 2 групи (групи А та В, позначені відповідними кольорами) представлено на рис. 1.

Навколишнє електричне поле, яке змінюється зі швидкістю, нижчою за швидкість обертання польового млина, індукує струм, амплітуда якого прямо пропорційна величині напруженості поля. Для вимірювання амплітуди індукованого струму розроблена функціональна схема ЕФ, представлена на рис. 2.

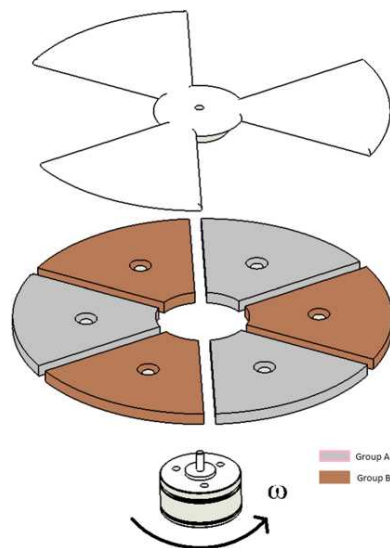


Рис. 1. Узагальнений вигляд сенсорної пластини

Сигнал з сенсорної пластини потрапляє до трансїмпедансного підсилювача (ТП), який перетворює вхідний струм в напругу.

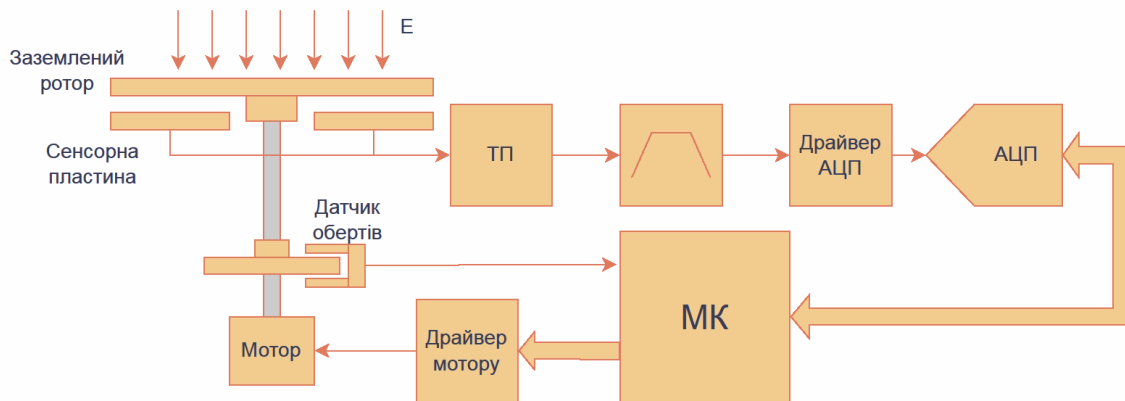


Рис. 2. Розроблена функціональна схема електростатичного флюксометра

Наступним кроком сигнал проходить через смуговий фільтр для виокремлення корисного сигналу та зменшення впливу широкопasmового шуму. Для підвищення точності перед перетворенням аналогового сигналу в цифровий, сигнал посилюється та набуває зміщення у відповідності до вхідних параметрів АЦП. Дані, отримані на цьому етапі, потрапляють до мікроконтролера (МК), який опрацьовує сигнал та розраховує величину напруженості електричного поля.

Оскільки від частоти обертів двигуна залежить точність визначення напруженості електричного поля (формула приведена у наступному розділі), МК також отримує дані про частоту обертів та положення двигуна з оптичного датчика, та здатен до корекції частоти, керуючи драйвером двигуна (виконує роль ПІД контролера).

Отримані дані про положення ротора допомагають визначити знак вимірювальної напруги, а отримане значення частоти обертів двигуна нівелює похибки, пов'язані з дрейфом цього параметру

Математична модель сенсору електростатичного флюксометра

Виходячи з будови сенсорної пластини, коли її чутливі елементи піддаються дії електричного поля, на них накопичується заряд відповідно до виразу:

$$q(t) = \varepsilon_0 E S(t), \quad (1)$$

де $q(t)$ – заряд, накопичений на обкладинці за час t , E – фонове електричне поле, $S(t)$ – відкрита площа пластин, змінна в часі, ε_0 – діелектрична проникність середовища. Для безперервного рівномірно обертового ротора відкриту площу $S(t)$ можна описати синусоїдою, тоді вираз (1) набуває вигляду:

$$q(t) = \varepsilon_0 E S_0 \sin(n\omega t), \quad (2)$$

де S_0 – номінальна площа набору пластин, ω – кутова швидкість ротора, n – кількість секторів вимірювальної пластини.

Електростатичні флюксометри можуть мати різну кількість секторів вимірювальної пластини та відповідну кількість екрануючих лопаток. Ефективний струм, індукований в електродах, можна визначити, взявши похідну за часом рівняння (2):

$$I(t) = \varepsilon_0 E S_0 n \omega \cos(n\omega t). \quad (3)$$

Площа одної групи сенсорних пластин дорівнює половині площі кільця, утвореного зовнішнім радіусом R пластини та внутрішнім радіусом r основи, за допомогою якої вона кріпиться до ротора (Рис. 3), знаходиться з співвідношення:

$$S_0 = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{2}. \quad (4)$$

Розписавши кутову частоту обертів двигуна як $\omega = 2\pi f$, виконаємо підстановку співвідношення (4) до виразу (3) та після скорочення отримуємо наступну формулу:

$$I(t) = \pi^2 (R^2 - r^2) \varepsilon_0 E n f \cos(n\omega t). \quad (5)$$

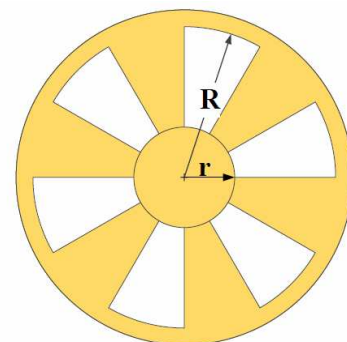


Рис. 3. Геометричні параметри екрануючої пластини

Проаналізувавши складові отриманого виразу (5), зрозуміло, що на величину амплітуди струму $I(t)$ крім напруженості поля E також впливає площа сенсорної пластини $\pi(R^2 - r^2)$ та частота екранування пластин, що складається з власної частоти обертів екрануючої пластини f та кількості секторів n .

Тобто для збільшення чутливості сенсорної пластини існують три шляхи:

- збільшення площі пластини;
- підвищення частоти обертів;
- збільшення кількості секторів пластини.

Для встановлення оптимальних геометричних розмірів пластини, частоти її обертів та кількості секторів необхідно провести низку моделювань її механічних та фізичних властивостей.

При з'єднанні сенсора з ТП утворюється подільник напруги, викликаний паразитною ємністю, яка утворюється між сенсорною та екрануючою пластиною та являє собою плоский конденсатор. Ємність цього конденсатора змінюється з часом, що викликано обертанням пластин, та може бути описана за допомогою синусоїдального закону. Відстань між пластинами відносно велика, а провідним середовищем між ними виступає повітря, тому при великому входному імпедансі підсилювача паразитною ємністю можна знехтувати.

Методологія розрахунку функціональних елементів електростатичного флюксометра

Для оцінки чисельного значення похибки вимірювання напруженості електростатичного поля розглянемо інструментальні похибки, що виникають при її вимірюванні. Відповідно до функціональної схеми авторами запропонована наступна методологія розрахунку передатного відношення схеми та шуму, що в ній виникає.

Основні рівняння трансімпедансного підсилювача

Перед тим, як перейти до розрахунку величини шуму, який виникає при перетворенні струму в напругу, було розглянуто типову схему ТП, наведену на рис. 4. Коефіцієнт перетворення струму в напругу для даної схеми розраховується за допомогою наступної формули:

$$K_{U/I} = \frac{E_{out}}{I_p} = -R_f. \quad (6)$$

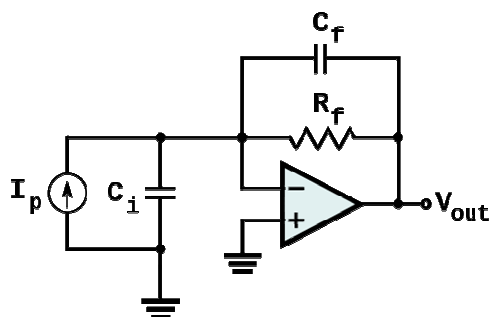


Рис. 4. Схема трансімпедансного підсилювача з фільтром низьких частот

Для зменшення частотного діапазону в схемі передбачено ємнісний зворотній зв'язок (конден-

сатор C_f), за допомогою якого встановлюється частота зрізу підсилювача, що описується виразом

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C_f}. \quad (7)$$

Величина шуму підсилювача залежить від шумового спектру частот (NBW – Noise Bandwidth), який пропорційний частоті зрізу підсилювача (7), знаходиться за формулою:

$$NBW = f_c \cdot K_n, \quad (8)$$

де K_n – коефіцієнт граничного перетворення, для системи першого порядку він становить $K_n = \pi/2$. Шуми підсилювача можна розбити на три основні групи: струмові шуми (E_{ni}), теплові шуми, що виникають у провідниках (E_{nr}), та шуми, викликані флуктуацією напруги (E_{nv}).

Тепловий шум, або ще відомий як шум Джонсона-Найквіста, викликаний хаотичним рухом носіїв заряду у провідниках, знаходиться з наступного виразу:

$$E_{nr} = \sqrt{4kTR_f \cdot NBW}, \quad (9)$$

де k – стала Больцмана ($1.381e-23$ Дж/К), T – температура у Кельвінах (за кімнатної температури в 25°C становить 298 К).

Струмові шуми, викликані асиметрією струму споживання входного каскаду підсилювача (i_n характеристика підсилювача) та входними струмовими шумами сенсора (i_s), у загальному вигляді розраховуються за формулою:

$$E_{ni} = R_f \cdot \sqrt{i_n^2 + i_s^2} \cdot \sqrt{NBW}. \quad (10)$$

Шуми, викликані флуктуацією напруги, мають багато складових, з яких варто виділити дві основні: $1/f$ шум та широкопasmовий шум або білий шум. Узагальнений графік залежності щільності шуму e_n від частоти f приведений на рис. 5. Ліва частина графіка – область $1/f$ -шуму, а з правої частини графіка переважає широкопasmовий шум.

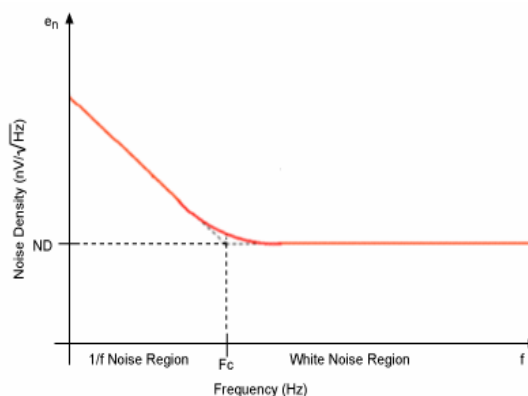


Рис. 5. Узагальнений вигляд графіка залежності щільності шуму від частоти

Фліккер-шум або $1/f$ -шум – це низькочастотний шум, щільність якого обернено пропорційна частоті. Загальне співвідношення, яке описує ве-

личину шуму напруги або струму в області $1/f$, має вигляд:

$$E_{1/f} = e_n \cdot \sqrt{f_0} \sqrt{\ln\left(\frac{f_c}{f_L}\right)}, \quad (11)$$

де e_n – спектральна щільність шуму (характеристика операційного підсилювача (ОП)), f_0 – частота початку відліку шкали (типове значення [0,1;1] Hz), f_L – нижня частота, з якої починається розрахунок шуму (типове значення 0,1 Hz).

Широкопasmовий або білий шум характеризується рівномірним розподіленням у всьому частотному діапазоні, в якому працює ОП. Розраховується за формулою:

$$E_{BB} = e_n \cdot \sqrt{NBW}. \quad (12)$$

Тоді загальний шум флуктуації напруги визначається як скалярний добуток виразів (11) та (12):

$$E_{nv} = \sqrt{E_{1/f}^2 + E_{BB}^2}. \quad (13)$$

Середньоквадратичне відхилення σ результуючої величини шуму на виході підсилювача розраховується як скалярний добуток всіх трьох складових (9), (10) та (13):

$$\sigma = \sqrt{E_{ni}^2 + E_{nr}^2 + E_{nv}^2}. \quad (14)$$

Використовуючи правило трьох сігм, практично всі значення нормального гаусівського розподілу знаходяться в інтервалі $[x \pm 3\sigma]$, тому пікова напруга шуму, з вірогідністю 99,7%, складає:

$$E_{npp} = 6\sigma. \quad (15)$$

Приведена методологія розрахунку шумів трансїмпедансного підсилювача допоможе встановити оптимальні параметри ОП, на які варто звернути увагу при його виборі.

Розрахунок смугового фільтра

Для зменшення впливу білого шуму на результати вимірів застосовують фільтрацію. Оскільки інформативний сигнал знаходиться на одній конкретній частоті (а саме $n\omega$), доцільно використовувати смуговий фільтр. Застосування смугового фільтра зменшить частотну смугу шуму NBW на виході ТП, тим самим в разі зменшить вплив всіх шумових складових. Типовою схемою для ЕФ є фільтр з багатопетлевым негативним зворотнім зв'язком, схема якого представлена на рис. 6.

Особливістю даної схеми фільтра є можливість регулювання резонансної частоти, яка визначається наступною формулою

$$f_r = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}. \quad (16)$$

Окрім фільтрації, ця схема передбачає посилення сигналу в області резонансної частоти на величину:

$$K_U = \frac{R_2}{2R_1}. \quad (17)$$

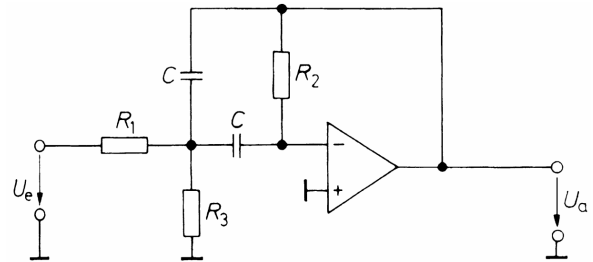


Рис. 1. Схема смугового фільтра нижніх частот з багатопетлевым негативним зворотнім зв'язком

Добротність Q схеми впливає на швидкість спадання фронтів, розраховується за допомогою виразу

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 R_3}} = \pi R_2 C f_r. \quad (18)$$

З представлених співвідношень видно, що коефіцієнт передачі, добротність та резонансна частота смугового фільтра можуть вибиратися довільно. З виразу (18) отримуємо формулу для розрахунку смуги пропускання фільтра:

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{1}{\pi R_2 C}. \quad (19)$$

Ще однією перевагою є те, що дана схема не схильна до генерації флуктуацій на резонансній частоті при неточно розрахованих параметрах.

Критерії вибору оптимального аналогового перетворювача (АЦП)

Для розрахунку оптимальних параметрів АЦП, від рівня квантування якого залежить точність вимірювання, потрібно розрахувати співвідношення сигнал/шум на виході схеми підсилювачів. Знаючи інформацію про амплітуду вхідного сигналу та величину шуму, можна обчислити відношення сигнал/шум (SNR - Signal noise ration) на виході АЦП, використовуючи наступну формулу:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{A_s}{A_n} \right), \quad (20)$$

де A_s – середньоквадратичне значення амплітуди інформаційного сигналу, A_n – середньоквадратичне значення загального шуму.

Середньоквадратичне значення амплітуди інформаційного сигналу на вході АЦП буде дорівнювати добутку амплітуди сигналу з сенсора (5), коефіцієнту трансформації (6) та коефіцієнту підсилення (17).

З виразу (5) видно, що амплітуда набуде свого максимального значення при $\cos(n\omega t) = 1$, отже для спрощення розрахунків приймемо $t = 0$. Тоді вираз набуває наступного виду

$$A_s = \frac{I(0) \cdot K_{U/I} \cdot K_U}{\sqrt{2}}. \quad (21)$$

Середньоквадратичне значення шуму буде складатися з скалярного добутку шуму сенсора та власних шумів підсилювачів. Приймаючи частотну смугу шуму такої, що дорівнює частотній смузі пропускання смугового фільтра (19), розраховується величина пікової напруги шуму ТП. При проходженні смугового фільтра даний шум збільшиться відповідно до коефіцієнту підсилення, який визначається за виразом (17). Власними шумами, виникаючими в смуговому фільтрі, можна знехтувати, адже вони значно менші за шуми ТП. Тоді середньоквадратичне значення амплітуди шуму знаходиться з рівняння:

$$A_n = E_{n_{pp}} \cdot K_U. \quad (22)$$

Знаючи величину SNR (20), можна розрахувати ефективну кількість бітів (ENOB – efficient number of bits), що допоможе при виборі оптимального за характеристиками АЦП. Це співвідношення описується виразом

$$ENOB = \frac{SNR - 1.76}{6.02}. \quad (23)$$

За можливості слід використовувати передискретизацію, щоб зменшити значення критерію ENOB. Зменшення ENOB на n -біт досягається збільшенням частоти дискретизації у $4n$ рази більше, ніж найвища частота корисного сигналу.

Висновки

В статті було запропоновано та обґрунтовано використання універсальної математичної моделі сенсору ЕФ з метою зменшення його методичної похибки. Також приведений в роботі аналіз складових побудованої математичної моделі дозволить підібрати оптимальні параметри будови сенсору ЕФ.

У результаті наступного етапу дослідження було побудовано власну функціональну схему ЕФ, для якої було описано методику розрахунку інструментальної похибки. Розроблена методологія дозволяє встановити оптимальні параметри елементів схеми під час проектування приладу та при підборі комплектуючих.

Продовженням даної тематики буде проведення експериментального дослідження запропонованої математичної моделі сенсору ЕФ, в результаті якого буде встановлено чисельне значення методичної похибки.

Також буде доцільно провести моделювання геометричних та фізичних характеристик сенсорної пластини ЕФ для досягнення максимальної чутливості, що допоможе покращити співвідношення сигнал/шум, тим самим зменшить вплив інструментальної похибки на результат вимірювання.

Література

- [1] C. Liu, E. R. Williams, E. J. Zipser & G. Burns, "Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit", *Journal of the Atmospheric Sciences*, pp. 309-323, 2010.
- [2] R. Markson, "The global circuit intensity: Its measurement and variation over the last 50 years", *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 223-242, 2007.
- [3] R. Roble and I. Tzur, "The global atmospheric electrical circuit", in *The Earth's electrical environment*, Washington, DC, National Academies Press, 1986, pp. 206-231.
- [4] R. J. Blakeslee, D. M. Mach, M. G. Bateman & J. C. Bailey, "Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit", *Atmospheric Research*, pp. 135-136, 228-243, 2014.
- [5] M. Mach, R. J. Blakeslee, M. G. Bateman and J. C. Bailey, "Comparisons of total currents based on storm location, polarity, and flash rates derived from high-altitude aircraft overflights", *Journal of Geophysical Research*, 2010.
- [6] D. M. Mach, R. J. Blakeslee and M. G. Bateman, "Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics", *Journal of Geophysical Research*, 2011.
- [7] F. J. W. Whipple, "Modern views on atmospheric electricity", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, pp. 199-222, 2007.
- [8] S. V. Anisimov, S. V. Galichenko, K. V. Aphinogenov and A. A. Prokhorchuk, "Evaluation of the atmospheric boundary-layer electrical variability", *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 327-348, 2017.
- [9] G. M. Lucas, J. P. Thayer та W. Deierling, "Statistical analysis of spatial and temporal variations in atmospheric electric fields from a regional array of field mills", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, pp. 1158-1174, 2017.
- [10] G. R. Harrison, "The carnegie curve. Surveys in Geophysics", Springer Science, pp. 209-232, 2012.
- [11] E. A. Jacobson and E. P. Krider, "Electrostatic field changes produced by Florida lightning", *Journal of the Atmospheric Sciences*, pp. 103-117, 1976.
- [12] W. J. Koshak and E. P. Krider, "Analysis of lightning field changes during active Florida thunderstorms", *Journal of Geophysical Research*, p. 1165, 1989.
- [13] W. J. Koshak & E. P. Krider, "A linear method for analyzing lightning field changes", *Journal of the Atmospheric Sciences*, pp. 473-488, 1994.

- [14] L. M. Maier & E. P. Krider, "The charges that are deposited by cloud-to-ground lightning in Florida", *Journal of Geophysical Research*, pp. 13,275-13,289, 1986.
- [15] M. J. Murphy, E. P. Krider & M. W. Maier, "Lightning charge analyses in small convection and precipitation electrification (CaPE) experiment storms", *Journal of Geophysical Research*, pp. 29,615-29,626, 1996.
- [16] M. G. Bateman, M. F. Stewart, S. J. Podgorny, H. J. Christian, D. M. Mach and R. J. Blakeslee, "A low-noise, microprocessor-controlled, internally digitizing rotating-vane electric field mill for airborne platforms", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, pp. 1245-1255, 2007.
- [17] S. Chauzy, J. C. Medale, S. Prieur and S. Soula, "Multilevel measurement of the electric field underneath a thundercloud: 1. A new system and the associated data processing", *Journal of Geophysical Research*, pp. 22,319-22,326, 1991.
- [18] W. P. Winn та C. B. Moore, "Electric field measurements in thunderclouds using instrumented rockets", *Journal of Geophysical Research*, pp. 5003-5017, 1971.
- [19] J. A. Chalmers, *Atmospheric electricity*. New York, Pergamon Press, 1967, p. 128.
- [20] J. N. Chubb, "Two new designs of 'field mill' type fieldmeters not requiring earthing of rotating chopper", *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1178-1181, 1990.
- [21] G. P. Harnwell та S. N. Voorhis, "An electrostatic generating voltmeter", *Review of Scientific Instruments*, pp. 540-541, 1933.
- [22] M. N. Horenstein and P. R. Stone, "A micro-aperture electrostatic field mill based on MEMS technology", *Journal of Electrostatics*, pp. 51-52, 515-521, 2001.
- [23] D. J. Malan та B. F. J. Schonland, "An electrostatic fluxmeter of short response-time for use in studies of transient field-changes", *Proceedings of the Physical Society*, pp. 402-408, 1950.
- [24] W. W. Mapleson & W. S. Whitlock, "Apparatus for the accurate and continuous measurement of the Earth's electric field", *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, pp. 61-72, 1955.
- [25] P. E. Secker, "The desing of simple instruments for measurement of charge on insulating surfaces", *Journal of Electrostatics*, pp. 27-36, 1975.
- [26] J. Chubb and J. Harbour, "A system for the advance warning of risk of lightning", in *Paper presented at the Electrostatics Society of America 'ESA 2000' meeting Niagara Falls*, June 18-21 2000, Niagara Falls, 2000.
- [27] J. Montanya, J. Bergas and B. Hermoso, "Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning", *Journal of Electrostatics*, pp. 241-246, 2004.
- [28] M. J. Murphy, R. L. Holle & N. W. S. Demetriades, "Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations", in *20th International Lightning Detection Conference (ILDC)*, Tucson, USA, 2008.
- [29] В. Г. Баженов та О. А. Повшенко, "Аналіз сучасних методів вимірювання електричних полів", *Sciences of Europe*, № 101, pp. 72-77, 2022.
- [30] В. С. Аксельрод, В. А. Мондрусов та К. Б. Щигловский, "Методы и средства измерения напряженности и потенциала электрического поля", у *Методы и средства измерения параметров электрического поля*, 1964, с. 80-97.
- [31] A. Antunes de Sá, R. A. Marshall, A. P. Sousa, A. Viets та W. Deierling, "An array of low-cost, high-speed, autonomous electric field mills for thunderstorm research, Earth and Space Science, 3 November 2020.
- [32] C. Yong, Y. Haiwen, S. Xiao, Z. Luxing, L. Yumeng та L. Liwei, «Model, Design and Testing of Field Mill Sensors for Measuring Electric Fields under High-Voltage Direct Current Power Lines,» *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2016.
- [33] D. S. Chester, "Electrical storm forecastsystem", The United States of America Patent US4095221, 13 07 1978.
- [34] T. J. Wells and R. S. Elliott, "Micro-electrometer", The United States of America Patent US 6,982,549 B1, 3 7 2006.
- [35] J. A. Swenson, W. H. Beasley, L. G. Byerley and I. G. Bogoev, "Electric-field meter having current compensation", The United States of America Patent US 7.256,572 B2, 14 9 2007.

UDC 621.3.082.72

V. Bazhenov, O. Povcshenko*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***METHODOLOGICAL FEATURES OF CALCULATING ERRORS IN THE MEASUREMENT OF ELECTROSTATIC FIELD STRENGTH**

Measuring the intensity of the electric field of the atmosphere today has become a widespread task of modern meteorology. After all, the distribution of the intensity of the local electric field near the surface of the earth is closely related to the global distribution of thunderstorms and electrified clouds.

The force characteristic of an electric field is its intensity. The change in the atmospheric electric field occurs relatively slowly, so electrostatic field mill (EFM) are most widely used to measure the electric field strength.

Electrostatic field mills have been used to monitor the electric field in good weather, measure the vertical electric field inside clouds, and observe the movement and evolution of storms. Various designs of EFM have been developed and documented for more than a century, but since the subject is not popularized, their construction methods and calculation features are not documented. Therefore, there was a need to generalize the structure of the device and calculate its metrological characteristics.

The work is aimed at increasing the accuracy of measurement and improving the hardware of electrostatic field mills. The task of increasing the accuracy of measuring the electrostatic field on a straight line depends on reducing the errors that occur in the device. The causes of these errors can be attributed to the imperfection of the measurement method or the inconsistency of the measurement object to its model, as well as the properties of the measurement tools. In previous studies, the authors used a mathematical model of the EF sensor, which does not correspond to the real shape of the signal, which created the need for its improvement.

In this work, the authors proposed and substantiated a universal mathematical model of the EFM sensor. The paper also provides an analysis of the components of the proposed mathematical model, which will allow choosing the optimal structural parameters of the EFM sensor, which will increase its sensitivity. In addition, the paper proposed its own functional scheme of the EFM and developed a methodology for calculating its instrumental error, which allows to single out critical parameters during the selection of components for the construction of the device.

The aspects considered in this article substantiate the relevance of increasing the accuracy of measuring the electrostatic field strength. The work carried out is the beginning of research aimed at improving the hardware of electrostatic field mills.

Key words: measurement; electrostatic field; electrostatic field mill; measurement errors.

*Надійшла до редакції
18 січня 2023 року*

*Рецензовано
12 лютого 2023 року*



© 2023 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).