УДК 620.92:551.594.1

О. О. Лисак; М. М. Мошноріз, канд. техн. наук, доц.

ВІДБІР ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ АТМОСФЕРНИХ ПОЛІВ: ОБМЕЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ГІБРИДНОГО ПІДХОДУ

Атмосфера Землі утворює глобальне електричне коло — природну електродинамічну систему, що підтримує квазістаціонарну різницю потенціалів близько 250 кВ між іоносферою та земною поверхнею. Попри значний сумарний потенціал, практичне використання цієї енергії стримується надзвичайно малою густиною струму провідності у приземному шарі за умов «хорошої погоди» (близько 2 пА/м²), зумовленою високим питомим опором повітря. Метою роботи є аналіз літературних джерел за темою відбору електричної енергії атмосферних полів та формування теоретичного підходу до використання енергії електричного поля Землі, який дозволить забезпечити безперебійність живлення малопотужних автономних споживачів в умовах нестабільного або відсутнього електропостачання. У роботі систематизовано та класифіковано відомі методи відбору на пасивні (геометричні) й активні (радіаційні, термічні, лазерні), виконано їх порівняльний аналіз і простежено історичну зміну парадигми – від орієнтації на промислові потужності до живлення малопотужних автономних споживачів. Показано, що обмеження пасивних методів має пороговий характер: за характерної для «хорошої погоди» напруженості поля коронний розряд на колекторі не ініціюється і стійке струмознімання відсутнє. Для активних методів формалізовано проблему енергетичного балансу: витрати енергії на примусову іонізацію повітря часто перевищують відібрану потужність, що робить такі системи енергетично збитковими. Обґрунтовано гібридний кінетико-електростатичний метод, у якому ініціація коронного розряду здійснюється електростатичним генератором типу «Дірод» із вітровим приводом, завдяки чому локальна провідність повітряного проміжку підвищується без витрат енергії, відібраної з атмосферного електричного поля, та без додаткового підведення палива; отримано необхідну умову енергетичної доцільності такої системи. Аргументовано, що запропонований підхід доцільний не як альтернатива класичній генерації, а як засіб забезпечення безперебійності автономної роботи окремих класів малопотужних споживачів завдяки постійній наявності атмосферного електричного поля «хорошої погоди».

Ключові слова: *атмосферна електрика, глобальне електричне коло, коронний розряд, енергетичний баланс, гібридні методи, електростатичний генератор, харвестинг енергії.*

Вступ

Сучасна енергетика розвивається у напрямку диверсифікації джерел енергії, залучаючи поряд із розвиненими сонячною та вітровою енергетикою й менш досліджені нетрадиційні джерела відновлюваної енергії. Однією з таких перспективних сфер є використання електричної енергії атмосферних полів, яка досі залишається переважно предметом фундаментальних, а не прикладних досліджень.

Атмосфера Землі функціонує як глобальне електричне коло (ГЕК) – природна електродинамічна система, у якій між іоносферою та поверхнею планети підтримується квазістаціонарна різниця потенціалів порядку 250 кВ [1, 2]. Цей контур підтримується грозовою активністю та електрифікованими хмарами, а його вплив на кліматичні та атмосферні процеси активно вивчається [3, 4]. Проте у приземному шарі атмосфери за умов «хорошої погоди» густина вертикального струму провідності становить лише близько 2 пА/м² [1]. Саме ця надзвичайно мала густина струму, зумовлена високим питомим опором повітря, є фундаментальним чинником, що обмежує практичне використання атмосферної електрики.

Слід наголосити, що доцільність використання енергії атмосферного електричного поля у цьому дослідженні розглядається не з позицій заміщення розвинених джерел генерації, а з позицій безперебійності автономного живлення. Для розосереджених малопотужних споживачів – сенсорів, метеостанцій, телеметричних та моніторингових комплексів у

віддалених чи важкодоступних районах – визначальними є не лише вартість одиниці енергії, а й автономність, тривалість роботи без обслуговування та масогабаритні характеристики джерела. Атмосферне електричне поле «хорошої погоди» існує безперервно, незалежно від пори року та часу доби [1, 16], тому його використання як додаткового джерела потенційно дозволяє забезпечити безперервність живлення таких споживачів в умовах нестабільного або відсутнього електропостачання. Саме це визначає актуальність та практичну спрямованість розглянутої проблеми.

Аналіз досліджень і публікацій

Історія спроб відбору атмосферної електрики налічує понад півтора століття та десятки патентів. Перші технічні пропозиції щодо її утилізації з'явилися ще в середині XIX ст. Так, у патенті Віона [5] запропоновано збирання атмосферної електрики за допомогою піднятих колекторів. Патентний опис мав суто якісний характер: у ньому не наводилося ані кількісних оцінок доступної потужності, ані аналізу внутрішнього опору атмосфери як джерела, тому працездатність та енергетична доцільність такої системи залишилися необґрунтованими.

На початку XX ст. концепцію активного збору розвинув Плаусон [6, 7]. У монографії [6] та патенті [7] описано аеростатні колектори з радіоактивним покриттям і розвиненою системою вістер, які, за задумом автора, мали забезпечувати відбір енергії у промислових обсягах. Проте наведені автором оцінки потужності не були підтверджені незалежними експериментами, а застосування радіоактивних матеріалів є неприйнятним з погляду сучасних норм радіаційної безпеки. Нерозв'язаною залишилася головна суперечність між очікуваними промисловими потужностями та фактичною провідністю приземного шару атмосфери.

Теоретичним підґрунтям подальших досліджень стала праця Вілсона [8], у якій сформульовано модель глобального електричного кола, що визначила парадигму атмосферної електрики XX ст. Ця модель пояснила механізм підтримання різниці потенціалів між іоносферою та поверхнею Землі грозовою активністю, однак завдання відбору енергії з ГЕК у ній не ставилося.

Принципову можливість практичного використання енергії атмосферного поля експериментально підтвердив О. Єфименко [10], який продемонстрував живлення електростатичних двигунів від атмосферного електричного поля за допомогою піднятих антен, із джерелом іонізуючого випромінювання. Водночас отримані потужності виявилися достатніми лише для демонстраційних пристроїв, а використання радіоактивних іонізаторів суперечить сучасним вимогам радіаційної безпеки, що ускладнює безпосереднє відтворення й розвиток такого рішення.

Кількісну оцінку граничних можливостей джерела виконав Дж. Кроулі [12] за допомогою еквівалентної схеми Тевеніна. Показано, що навіть за гіпотетичного прямого підключення навантаження до іоносфери максимальна теоретично доступна потужність має порядок лише десятків мегават, а для колектора на реально досяжних висотах вона не перевищує одиниць ват. Звідси зроблено висновок, що доцільними можуть бути застосування, пов'язані з живленням малопотужних споживачів. Разом з тим способів зменшення перехідного опору між колектором та атмосферою без додаткових витрат відібраної енергії у праці не розглянуто.

До подібних висновків дійшов М. Бройєр [13], який проаналізував механізми генерації атмосферного заряду, швидкість відновлення поля та густину енергії атмосферного електричного поля порівняно з іншими джерелами. Підтверджено непридатність цього джерела для генерації у промислових масштабах та окреслено можливі схеми відбору заряду, зокрема з використанням електростатичних двигунів; проте інженерного рішення для стійкого відбору струму за умов «хорошої погоди» не запропоновано.

Про збереження прикладного інтересу до проблеми свідчить сучасна патентна активність, зокрема патент на систему відбору атмосферної електрики [9]. Водночас патентний опис не містить аналізу енергетичного балансу та експериментального підтвердження ефективності, тому питання енергетичної доцільності таких систем залишається відкритим.

Історичний розвиток методів, що спираються на явище стікання струму з вістря (point discharge), детально простежено авторами огляду [11]. У ньому, зокрема, наведено емпіричні параметризації струму стікання, починаючи з класичної залежності Уіппла–Скрейса, згідно з якою струм з'являється лише після перевищення градієнтом потенціалу певного порогового значення. Це пояснює принципове обмеження пасивних колекторів за умов «хорошої погоди», однак способів штучного виконання порогової умови без витрат відібраної енергії у праці не розглянуто.

Сучасні експериментальні дослідження підтверджують пороговий характер цього обмеження. Зокрема, автори праці [14] розробили індуктивний сенсор та виміряли імпульсні коронні розряди із заземлених стрижнів; показали, що такі розряди спостерігаються лише за високих фонових полів, характерних для грозових умов. Отже, за характерної для «хорошої погоди» напруженості поля коронний розряд на заземленому вістрі самостійно не ініціюється; питання його штучної ініціації у праці не порушувалося.

У праці [15] за допомогою безпілотних літальних апаратів експериментально досліджено струми, індуковані атмосферним електричним потенціалом у вітроенергетичних установках. Підтверджено, що підняті заземлені конструкції взаємодіють з атмосферним полем і через них протікають вимірювані струми, проте дослідження зосереджене на аспектах блискавкозахисту, а не на цілеспрямованому відборі енергії.

Сучасний стан фундаментальних уявлень про ГЕК узагальнено в оглядових працях [1 – 4]. У них уточнено ключові параметри кола – іоносферний потенціал близько 250 кВ та густину струму провідності близько 2 пА/м² у приземному шарі [1, 2], а також розглянуто зв'язок ГЕК із кліматичними та атмосферними процесами [3, 4]. Ці праці формують узгоджену параметричну базу для інженерних оцінок, однак задач відбору енергії не розглядають.

У попередніх працях авторів виконано первинну систематизацію методів відбору атмосферної електрики [17] та запропоновано концепцію активної аеродинамічної іонізації [18], проте теоретичного обґрунтування енергетичної доцільності такого підходу наведено не було.

Відомі методи відбору атмосферної електрики можна класифікувати за двома підходами. Пасивні (геометричні) методи функціонують за рахунок «ефекту вістря» – локального підсилення напруженості поля залежно від радіуса кривизни колектора. За умов «хорошої погоди» напруженість поля, як правило, недостатня для стійкої ініціації коронного розряду, що обмежує величину струму. Активні методи передбачають примусову іонізацію повітря для збільшення ефективної площі колектора та зниження перехідного опору повітряного проміжку; залежно від способу іонізації їх доцільно поділяти на радіаційні, термічні та лазерні. Порівняльну характеристику методів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів відбору атмосферної електрики (за [17])

Метод	Реалізація	Переваги	Недоліки
Пасивний (геометричний)	Антени, вістря, колектори з великою площею контакту	Конструктивна простота, нульове енергоспоживання	Залежність від висоти підйому колектора
Активний (радіаційний)	Радіоактивні іонізатори	Стабільна іонізація, нижча залежність від висоти підйому колектора	Радіаційна небезпека
Активний (термічний)	Полум'яні іонізатори	Інтенсивніша іонізація, нижча залежність від висоти підйому колектора	Витрати палива
Активний (лазерний)	Імпульсні лазери	Відсутність фізичних провідників, висотних опор	Енергетична збитковість

Окремо слід відзначити історичну зміну парадигми щодо обсягів відбору енергії: якщо на початку XX ст. від активних систем очікували промислових потужностей [6, 7], то наведені вище кількісні оцінки [12, 13] зумовили перехід від орієнтації на промислову генерацію до задач живлення малопотужних споживачів.

Таким чином, аналіз публікацій засвідчує: принципова можливість відбору енергії атмосферного поля підтверджена експериментально, а її граничні обсяги оцінені теоретично; водночас пасивні методи обмежені пороговим характером струму стікання з вістря, а активні – від'ємним енергетичним балансом. Перспективним напрямком є розробка гібридних систем, які використовують відновлювану енергію навколишнього середовища для ефективного відбору атмосферної електрики з метою живлення малопотужних автономних споживачів. Невирішеною частиною загальної проблеми залишається теоретичне обґрунтування способу ініціації коронного розряду без витрат енергії, відібраної з атмосферного електричного поля, та без підведення палива, якому й присвячено цю статтю.

Мета роботи

Метою роботи є аналіз літературних джерел за темою відбору електричної енергії атмосферних полів та формування теоретичного підходу до використання енергії електричного поля Землі, який дозволить забезпечити безперебійність живлення малопотужних автономних споживачів в умовах нестабільного або відсутнього електропостачання.

Для досягнення мети розв'язуються такі задачі: систематизація та класифікація відомих методів відбору з виявленням їхніх спільних фізичних обмежень; формалізація обмежень пасивних методів та умови енергетичної доцільності систем із примусовою іонізацією; обґрунтування принципу дії гібридної кінетико-електростатичної системи, що задовольняє цю умову.

Виклад основного матеріалу

Вихідними для інженерного аналізу є параметри ГЕК як джерела. Густина струму провідності у приземному шарі визначається законом Ома в диференціальній формі (1):

$$J = \sigma E \tag{1}$$

де J – густина струму у заданій точці; σ – питома провідність повітря; E – напруженість електричного поля. За умов «хорошої погоди» напруженість поля біля поверхні землі становить лише близько 100 В/м [16], а густина струму провідності становить близько 2 пА/м² [1]. Отже, першопричиною малих відбираних струмів є не брак потенціалу, а надзвичайно мала питома провідність приземного шару повітря.

Граничні можливості джерела оцінюються за еквівалентною схемою Тевеніна [12]. Напруга холостого ходу піднятого колектора визначається електричним потенціалом атмосфери на висоті його розташування, а максимальна потужність, що може бути передана узгодженому навантаженню, становить (2):

$$P_{max} = ¼\ U_x\ I_k \tag{2}$$

де U_x – напруга холостого ходу колектора; I_k – струм короткого замикання, обмежений опором повітряного проміжку між колектором та іоносферою. Наведені вище оцінки [12, 13] кількісно окреслюють нішу застосування атмосферної електрики – живлення малопотужних споживачів.

Обмеження пасивних (геометричних) методів має пороговий характер. Згідно з класичною емпіричною параметризацією Уіппла–Скрейса, наведеною в огляді [11], струм стікання з вістря описується залежністю (3):

$$I = a(F^2 - M^2) \tag{3}$$

де I – струм стікання з вістря; F – градієнт потенціалу атмосферного поля; M – порогове значення градієнта, нижче якого розряд не виникає; a – емпірична стала. З (3) випливає, що за $F < M$ струм стікання відсутній. Оскільки за умов «хорошої погоди» напруженість поля є значно нижчою за значення, потрібні для ініціації коронного розряду на реальних колекторах, пасивні системи в цих умовах принципово не забезпечують стійкого струмознімання, що узгоджується з експериментальними даними [14].

Активні методи спрямовані на подолання зазначеного обмеження шляхом примусової іонізації повітря, проте породжують ключову проблему – проблему енергетичного балансу. Критична напруженість електричного поля, потрібна для виникнення самостійного коронного розряду в повітрі, має порядок 3 МВ/м (30 кВ/см), тоді як напруженість поля біля поверхні землі за умов «хорошої погоди» – лише порядку 100 В/м [16]. Для досягнення технологічно значущих струмів необхідно створити зону підвищеної провідності повітря, однак утворення коронного розряду часто потребує більше енергії, ніж може бути відібрано. Співвідношення відібраної та витраченої потужності описується рівнянням енергетичного балансу (4):

$$P_n = P_h - P_i \tag{4}$$

де P_n – чиста видобута потужність, доступна для корисного навантаження; P_h – потужність, відібрана з ГЕК; P_i – потужність, необхідна для підтримання примусової іонізації. У сталому режимі система є енергетично доцільною лише за умови $P_n > 0$, тобто коли відібрана потужність перевищує витрати на іонізацію. Для радіаційних, термічних та лазерних іонізаторів, які живляться відібраною енергією або потребують підведення палива, ця умова здебільшого не виконується, що й робить такі системи енергетично збитковими.

Подолання цього обмеження пропонується завдяки гібридному кінетико-електростатичному методу, який є комбінацією двох підходів: кінетичного (використання енергії вітрового потоку для приводу малопотужного роторного електростатичного генератора типу «Дірод») та електростатичного (відбір енергії атмосферного електричного поля через зону підвищеної провідності повітря, утворену коронним розрядом). Функції між складовими розподілено так: вітрова складова забезпечує лише ініціацію та підтримання розряду, тоді як корисна енергія відбирається безпосередньо з атмосферного електричного поля. Генератор, використовуючи енергію вітрового потоку, створює на електроді колектора локальну високу напругу, що перевищує поріг виникнення коронного розряду. Коронний розряд формує зону об’ємного заряду та збільшує ефективний радіус колектора, забезпечуючи протікання струму навіть за низької напруженості зовнішнього поля, недостатньої для роботи пасивних систем [18]. Структурно-функціональну схему системи наведено на рис. 1.

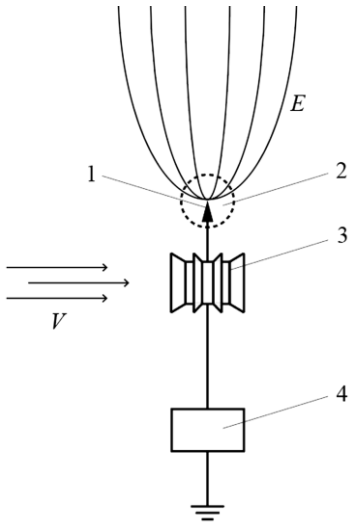


Рис. 1. Структурно-функціональна схема гібридної системи (за [18]): 1 – колектор; 2 – зона об'ємного заряду; 3 – електростатичний генератор «Дірод» із вітровим приводом; 4 – блок перетворення енергії; V – напрямок вітрового потоку; E – силові лінії атмосферного електричного поля

Вимоги до генератора, за яких ініціація коронного розряду є досяжною, можна оцінити з такого співвідношення: для електрода колектора, який у першому наближенні можна розглядати як сферу радіусом r_e під потенціалом U_e відносно навколишнього середовища, напруженість поля на його поверхні дорівнює $E = U_e/r_e$, тому умова ініціації коронного розряду набуває вигляду (5):

$$U_e \geq E_k r_e \tag{5}$$

де E_k – критична напруженість початку коронного розряду. З (5) випливає, що потрібна напруга ініціації знижується зі зменшенням радіуса кривизни електрода, що дозволяє знизити вимоги до вихідної напруги генератора, а отже, і до його масогабаритних характеристик. Слід враховувати, що значення E_k, своєю чергою, залежить від радіуса електрода та характеристик повітря, тому обґрунтований вибір параметрів електрода й генератора потребує математичного моделювання, що є завданням подальших досліджень. Очікується, що потужність P_i, потрібна для підтримання корони на електроді з малим радіусом кривизни, буде незначною порівняно з потужністю, яку можна відібрати від вітрового потоку.

Принциповою перевагою такого підходу є те, що енергія для іонізації надходить від стороннього відновлюваного джерела, а не від відібраної атмосферної енергії. З урахуванням цього рівняння енергетичного балансу набуває вигляду (6):

$$P_n = P_h + P_v - P_i \tag{6}$$

де P_v – потужність, отримана від вітрового потоку та спрямована на підтримання іонізації. Необхідною умовою енергетичної доцільності гібридної системи є покриття витрат на іонізацію вітровою складовою, тобто $P_v \geq P_i$; за її виконання $P_n \geq P_h > 0$, тобто енергетичний баланс системи залишається додатним навіть за умов «хорошої погоди». Таким чином, витрати на іонізацію компенсуються зовнішньою кінетичною енергією, а не ресурсом ГЕК.

Водночас ця умова є необхідною, але не достатньою для обґрунтування доцільності гібридної системи. Оскільки той самий вітровий потік може бути використаний і безпосередньо – у складі звичайного вітроелектричного генератора, – застосування гібридної системи є енергетично обґрунтованим лише тоді, коли завдяки синергії іонізуючої вітроустановки та колектора чиста потужність P_n перевищує потужність, яку аналогічний вітровий потік забезпечив би з урахуванням ККД індукційного або принаймні електростатичного вітрогенератора; інакше доцільнішим є пряме використання вітрового потоку, а інші компоненти системи не мають енергетичного сенсу. Доведення наявності такого синергетичного ефекту є одним із напрямків подальших досліджень.

Окремої уваги потребує стабільність роботи запропонованої системи. Вітровий потік є нестаціонарним, тому іонізація, що забезпечується вітровим приводом генератора, також є нестабільною: зрив коронного розряду призводить до припинення або різкого зменшення відбору потужності, що суперечить основному призначенню розробки – надійному безперебійному живленню споживачів там, де немає альтернативних джерел. Вирішення цієї проблеми також належить до напрямків подальших досліджень.

Важливо підкреслити обмежену сферу застосування запропонованого підходу. Він не розглядається як альтернатива класичній генерації або розвиненим сонячній та вітровій енергетиці, а як рішення, спрямоване на забезпечення безперебійності живлення автономних систем: атмосферне поле «хорошої погоди» наявне безперервно, тому гібридна система здатна живити малопотужні споживачі в умовах нестабільного або відсутнього електропостачання. Вирішальними тут є автономність, тривалість роботи та масогабаритні характеристики, а не абсолютна потужність чи вартість одиниці енергії. Слід зазначити, що наведені міркування мають теоретико-концептуальний характер; кількісна верифікація потребує математичного моделювання та експериментальних досліджень, що є предметом подальшої роботи.

Висновки

1. Систематизовано та класифіковано відомі методи відбору електричної енергії атмосферних полів на пасивні (геометричні) та активні (радіаційні, термічні, лазерні). Показано, що спільним чинником, який обмежує ефективність усіх методів, є надзвичайно мала густина струму провідності у приземному шарі атмосфери за умов «хорошої погоди», зумовлена малою питомою провідністю повітря.

2. Встановлено, що обмеження пасивних методів має пороговий характер: за характерної для «хорошої погоди» напруженості поля умова ініціації коронного розряду на колекторі не виконується і стійке струмознімання відсутнє. Обмеження активних методів формалізовано умовою енергетичного балансу: витрати на примусову іонізацію здебільшого перевищують відібрану потужність, що робить такі системи енергетично збитковими.

3. Сформовано теоретичний підхід до подолання зазначених обмежень – гібридний кінетико-електростатичний метод, у якому ініціацію коронного розряду здійснює електростатичний генератор із вітровим приводом. Отримано необхідну умову енергетичної доцільності такої системи: потужність, що відбирається від вітрового потоку, має покривати витрати на підтримання іонізації; за її виконання енергетичний баланс системи залишається додатним навіть за умов «хорошої погоди».

4. Запропонований підхід орієнтований не на заміщення традиційних джерел генерації, а на забезпечення безперебійності автономної роботи малопотужних споживачів в умовах нестабільного або відсутнього електропостачання завдяки постійній наявності атмосферного електричного поля.

5. Подальші дослідження передбачають математичне моделювання процесів енергетичного обміну в гібридній системі; доведення того, що завдяки синергії іонізуючої вітроустановки та колектора відбирається більше енергії, ніж від аналогічного вітрового потоку з урахуванням ККД індукційного або принаймні електростатичного вітрогенератора; забезпечення стабільності іонізації за нестаціонарного вітрового потоку; а також лабораторні та польові випробування розробленого засобу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Rycroft M. J. Some Recent Key Aspects of the DC Global Electric Circuit. *Atmosphere*. 2025. Vol. 16. Article 348. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos16030348.

2. Potdar S. S., Siingh D. The Atmospheric Global Electric Circuit: A Review. *Journal of the Indian Geophysical Union*. 2024. Vol. 28, № 4. P. 247–267.

3. Harrison R. G. The Global Atmospheric Electrical Circuit and Climate. *Surveys in Geophysics*. 2004. Vol. 25. P. 441–484. DOI: https://doi.org/10.1007/s10712-004-5439-8.

4. Williams E., Mareev E. Recent Progress on the Global Electrical Circuit. *Atmospheric Research*. 2014. Vol. 135–136. P. 208–227. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.015.

5. Improved Method of Utilizing Atmospheric Electricity : pat. 28793 A US : IPC G05B11/016. publ. 19.06.1860.

6. Plauson H. Gewinnung und Verwertung der atmosphärischen Elektrizität. Hamburg : Verlag von Boysen & Maasch, 1920. 128 p.

7. Conversion of Atmospheric Electric Energy : pat. 1540998 A US : IPC H05F7/00. №437,107 ; stat. 13.01.1921 ; publ. 09.06.1925.

8. Wilson C. T. R. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 1921. Vol. 221. P. 73–115. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0003.

9. System for harvesting atmospheric electricity : pat. 9160156 US : IPC H05F 7/00, B64D 45/02, H02G 13/00. № 13/276,259 ; stat. 18.10.2011 ; publ. 13.10.2015.

10. Jefimenko O. Operation of Electric Motors from the Atmospheric Electric Field. *American Journal of Physics*. 1971. Vol. 39, № 7. P. 776–779. DOI: https://doi.org/10.1119/1.1986281.

11. The role of point discharge in the historical development of atmospheric electricity / B. P. S. McGinness et al. *History of Geo- and Space Sciences*. 2025. Vol. 16. P. 51–63. DOI: https://doi.org/10.5194/hgss-16-51-2025.

12. Crowley J. M. The Fair-Weather Atmosphere as a Power Source. *Proceedings of the ESA Annual Meeting on Electrostatics*. 2011, 14–16 June 2011. Cleveland : Electrostatics Society of America, 2011. Paper A2. P. 1–14. URL: https://electrostatics.org/wp-content/uploads/2023/08/2011_A2.pdf (дата звернення: 01.06.2026).

13. Breuer M. L. Feasibility of tapping atmospheric charge as a power source. *Renewable Energy*. 2003. Vol. 28, №7. P. 1121–1127. DOI: https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00210-0.

14. Measuring low-current discharges from grounded rods under high background electric fields / M. Arcanjo et al. *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 217. Article 109139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109139.

15. On the Induced Currents to Wind Turbines by the Earth's Atmospheric Electric Potential: Experiments With Drones / P. Fontanes et al. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 21277–21290. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152777.

16. Harrison R. G. Fair weather atmospheric electricity. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011. Vol. 301. Article 012001. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/301/1/012001.

17. Лисак О. О., Мошноріз М. М. Методи відбору атмосферної електрики: обмеження та перспективи розвитку. *Матеріали LV науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2026)*, м. Вінниця, 24–27 берез. 2026 р. Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/995 (дата звернення: 28.09.2026).

18. Лисак О. О., Мошноріз М. М. Підвищення ефективності систем відбору атмосферної електричної енергії шляхом активної аеродинамічної іонізації. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026) : матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф*., м. Вінниця, 20 жовт. 2025 р. – 26 черв. 2026 р. Вінниця : ВНТУ, 2026. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/view/27830 (дата звернення: 28.09.2026).

Стаття надійшла до редакції 07.07.2026.
Стаття пройшла рецензування 04.09.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Лисак Олег Олександрович – аспірант групи G3-25a, факультет електроенергетики та електромеханіки, e-mail: lysak.fyi@gmail.com, ORCID: 0009-0009-6226-0709.

Мошноріз Микола Миколайович – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, e-mail: moshnoriz@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7626-8327.
Вінницький національний технічний університет.