

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-76>

УДК 621.396.96:537.523

КРАВЧЕНКО ВІТАЛІЙ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0009-4596-1933>

e-mail: Vitalii.Kravchenko@infiz.khpi.edu.ua

ЯКОВЕНКО ІГОР

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0003-7705-4584>

e-mail: Ihor.Yakovenko@khpi.edu.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ІОНІЗАЦІЇ В ПЛАЗМОВОМУ ОБМЕЖУВАЧІ ДЛЯ ЗАХИСТУ СУПУТНИКОВИХ СТАНЦІЙ

У статті розроблено математичну модель плазмового обмежувача для захисту супутникових антен від імпульсних перенапруг, спричинених блискачковими розрядами. Модель базується на рівняннях ударної іонізації, рекомбінації та балансі електронів із використанням коефіцієнтів Таунсенда, що дозволяє визначити порогову напругу запалювання, час реакції та динаміку зміни провідності плазмового каналу. Проведено чисельну верифікацію із застосуванням COMSOL Multiphysics та експериментальні вимірювання в умовах імпульсних впливів. Отримано узгодження результатів у межах 5–8 %. Показано скорочення часу спрацювання на 14 % та зменшення енергії, що надходить до навантаження, більш ніж на 50 % порівняно з незахищеним трактом. Запропонована модель може бути використана для інженерного проектування та оптимізації систем блискавкозахисту супутникових станцій.

Ключові слова: супутникова станція, розряд блискавки, плазмовий обмежувач, математична модель, іонізація, система блискавкозахисту.

KRAVCHENKO VITALII, YAKOVENKO IHOR

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

MATHEMATICAL MODEL OF THE IONIZATION PROCESS IN A PLASMA LIMITER FOR THE PROTECTION OF SATELLITE STATIONS

The article is devoted to the development and verification of a mathematical model of a plasma limiter designed to protect ground satellite stations from pulsed overvoltages caused by lightning discharges. The relevance of the work is due to the increasing requirements for the reliability of satellite telecommunication systems and the insufficient efficiency of traditional protection devices - gas dischargers, varistors and TVS diodes - in the case of ultrafast pulses with a front of up to units of microseconds and an amplitude of tens of kilovolts. The proposed model is based on the description of the processes of impact ionization and recombination in the gas gap using the Townsend coefficients, electron balance equations and the dependence of conductivity on the electric field strength. This allows us to quantitatively estimate the ignition threshold voltage, the plasma channel formation time and the dynamics of overvoltage limitation.

To verify the adequacy of the model, numerical simulations were carried out in the COMSOL Multiphysics environment (Plasma Module) and experimental studies were carried out under conditions of pulse effects close to the real parameters of a lightning discharge. The agreement of the calculated and experimental results within 5–8% was obtained, which confirms the correctness of the assumptions made. It is shown that the use of a plasma limiter provides a reduction in the response time of the protection system by 14%, a reduction in the pulse energy on the load by more than 50% compared to an unprotected path and by 30–35% compared to classical gas-discharge devices. The results obtained demonstrate the prospects for the use of plasma limiters in satellite systems and can be used for engineering design and optimization of lightning protection elements of telecommunication equipment.

Keywords: satellite station, lightning discharge, plasma limiter, mathematical model, ionization, lightning protection system.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Кравченко Віталій, Яковенко Ігор

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Наземні сегменти супутникових телекомунікаційних систем функціонують в умовах підвищених електромагнітних навантажень, зокрема під впливом атмосферних електричних розрядів, які є однією з основних причин відмов апаратури. Удари блискавки у фідерні лінії, антенно-щоголові споруди або елементи заземлення формують імпульсні перенапруги з амплітудами десятки кіловольт та фронтом тривалістю до одиниць мікросекунд. Через надзвичайно високу швидкоплинність і енергетичну насиченість таких імпульсів традиційні засоби захисту – газорозрядники, варистори, TVS-діоди – не завжди забезпечують належну швидкодію та ефективність обмеження енергії. Унаслідок цього виникає деградація або повний вихід з ладу критично важливих елементів супутникових станцій, зокрема малощумливих підсилювачів, перетворювачів частоти та передавальних трактів.

Зростання щільності розміщення антенних комплексів, підвищення потужності передавання та розширення спектра сервісів (супутниковий інтернет, телеметрія, навігаційне забезпечення) посилюють вимоги до електромагнітної стійкості наземної інфраструктури. Водночас сучасні кліматичні умови характеризуються підвищеною частотою екстремальних погодних явищ, що додатково збільшує ризик імпульсних перенапруг. Це

зумовлює необхідність пошуку нових технічних рішень, здатних забезпечити надшвидке реагування на різке зростання електричного поля та ефективне обмеження пікових значень напруги.

Перспективним напрямом є застосування плазмових обмежувачів, принцип роботи яких ґрунтується на процесі ударної іонізації та швидкому переході газового проміжку у високоіонізований стан із різким зростанням провідності. Проте їх практичне впровадження стримується відсутністю універсальних і водночас інженерно придатних математичних моделей, які б адекватно описували динаміку формування плазмового каналу, рекомбінаційні процеси, зміну провідності та залежність характеристик пристрою від параметрів імпульсу, геометрії та складу газу. Наявні підходи або спрощують фізику лавинного розряду, або є надмірно складними та потребують великої кількості експериментальних коефіцієнтів.

Таким чином, наукова проблема полягає у розробленні математичної моделі процесу іонізації в плазмовому обмежувачі, адаптованої до реальних характеристик блискавкових імпульсів у наземних супутникових станціях, яка забезпечуватиме баланс між фізичною достовірністю та обчислювальною придатністю для практичного інженерного застосування. Розв'язання цієї задачі створить теоретичне підґрунтя для оптимізації конструкції захисних пристроїв і підвищення електромагнітної стійкості супутникових телекомунікаційних систем загалом.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблема захисту антенних і фідерних трактів від імпульсних перенапруг базується насамперед на нормативній базі з блискавкозахисту та ЕМС. Стандарт IEC 62305-3 регламентує структуру зовнішнього й внутрішнього захисту, зонування LPZ та допустимі рівні імпульсних напруг на вводах обладнання [1]. Для телекомунікаційних і сигнальних ліній застосовуються документи серії IEC/EN 61643, зокрема IEC 61643-21 щодо SPD для мереж зв'язку [2], а рекомендації ITU-T K.44 та K.143 визначають методики випробувань і вимоги до стійкості обладнання [3-4]. Водночас ці документи розглядають SPD переважно як стандартизовані елементи з каталоговими параметрами без деталізації плазмової динаміки.

Інженерні рішення у сфері блискавкозахисту супутникових і радіорелейних систем спираються на підходи виробників SPD. У «Lightning Protection Guide» DEHN описано багатоступеневий захист із використанням коаксіальних розрядників і газорозрядних елементів для грубого обмеження енергії та напівпровідникових обмежувачів для остаточного формування імпульсу [5]. Технічні бюлетені підкреслюють необхідність узгодження класу SPD з рівнем LPL/LPS та дотримання концепції LPZ [6]. Методи оцінки ризику блискавкових ушкоджень із застосуванням IEC 62305 інтегруються з програмними засобами вибору апаратури [7], однак плазмові обмежувачі зазвичай описуються через порогову напругу, допустимий імпульсний струм і паразитну ємність без побудови повної моделі іонізації.

Експериментальну базу для дослідження дії імпульсів штучної блискавки формує НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ». У роботах [8-9] наведено характеристики високовольтного комплексу та генератора UITOM-1 для відтворення нормованих компонентів струму блискавки, сумісних із IEC 62305 та стандартами SAE, MIL-STD, АЕСТР. Офіційні матеріали центру підкреслюють його провідну роль у випробуваннях на стійкість до потужних імпульсних полів [10-11]. Проте ці дослідження зосереджені на генерації та метрології імпульсів, а не на мікрофізиці розряду в компактних газових проміжках SPD.

Дослідження НТУ «ХПІ» [12-13] присвячені електромагнітній сумісності напівпровідникових структур та впливу імпульсних полів на їх надійність. Роботи з систем раннього грозопопередження демонструють зв'язок між реальними грозовими умовами та експериментальними режимами випробувань [14-15]. Сукупно це формує перехід від макрорівня (статистика ударів, профілі імпульсів) до мікрорівня (вплив на елементи апаратури).

Отже, попри наявність розвиненої нормативної бази та експериментальної інфраструктури, у літературі бракує моделей, що поєднують опис іонізаційних процесів у газовому проміжку плазмового обмежувача з оцінкою часу реакції та енергетичних параметрів у режимах супутникових фідерних трактів. Саме ця прогалина визначає наукову нішу дослідження та обґрунтовує необхідність математичної моделі плазмового обмежувача для підвищення точності розрахунків захисту реальних супутникових станцій.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: розроблення математичної моделі процесу ударної іонізації в плазмовому обмежувачі, яка дозволяє кількісно оцінювати його динамічні характеристики за умов дії надшвидких імпульсних перенапруг, характерних для супутникових телекомунікаційних систем.

Для досягнення поставленої мети було сформовано наступні задачі:

- провести аналіз фізичних механізмів ударної іонізації та рекомбінації в газовому середовищі під дією сильного електричного поля;
- сформулювати математичний опис динаміки концентрації електронів і залежності коефіцієнта іонізації від параметрів електричного поля;
- розробити систему рівнянь для моделювання плазмового каналу з урахуванням зміни провідності та перерозподілу електричного поля в часі;
- визначити порогові умови запалювання плазми залежно від міжелектродного проміжку, тиску, складу газу та початкової концентрації електронів;
- розробити метод прогнозування моменту переходу до стійкої лавинної іонізації (умови спрацювання обмежувача);

- дослідити часові характеристики пристрою та встановити залежність часу реакції від параметрів імпульсу;
- сформулювати методику оцінювання енергії, що передається навантаженню після спрацювання обмежувача;
- провести чисельне та/або експериментальне дослідження енергетичної ефективності пристрою;
- виконати порівняльний аналіз запропонованої моделі з традиційними засобами захисту за показниками часу реакції, порогової напруги та переданої енергії.

Виклад основного матеріалу

Математична модель плазмового обмежувача ґрунтується на описі динаміки концентрації електронів та іонів у сильному електричному полі, що формується під час перенапруги, викликаній розрядом блискавки. Основними фізичними процесами є первинна ударна іонізація, лавинне розмноження електронів, а також рекомбінація, яка обмежує розвиток плазми. Для опису цих процесів введемо функцію концентрації електронів $n_e(t)$ та інтенсивність електричного поля $E(t)$.

Почнемо з базового рівняння електронної лавини, яке описує зміну концентрації електронів під дією ударної іонізації:

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha(E)n_e - \beta_r n_e^2. \quad (1)$$

Тут $\alpha(E)$ – коефіцієнт ударної іонізації (залежить від поля), β_r – коефіцієнт двочастинкової рекомбінації. Перша складова (αn_e) описує зростання електронної концентрації, друга ($\beta_r n_e^2$) – втрати через рекомбінацію.

Коефіцієнт ударної іонізації традиційно описують експоненційною залежністю Таунсенда:

$$\alpha(E) = A \exp\left(-\frac{B}{E}\right), \quad (2)$$

де A і B – емпіричні константи газового середовища. Значення A, B визначаються тиском і складом газу в плазмовому обмежувачі.

Ударна іонізація суттєво залежить від енергії електронів, тому електричне поле впливає на швидкість електронів:

$$v_e = \mu_e E, \quad (3)$$

де μ_e – рухомість електронів. Враховуючи (3), можна подати густину ударних зіткнень:

$$v_i = \alpha(E)v_e = \alpha(E)\mu_e E. \quad (4)$$

Це фактично швидкість утворення нових електронів у каналі плазми.

Розвиток плазмового каналу супроводжується зміною провідності газу. Для оцінки електропровідності використовується стандартна модель дрейфового струму:

$$\sigma(t) = q_e \mu_e n_e(t), \quad (5)$$

де q_e – заряд електрона. Це дозволяє визначити струм, який протікає через обмежувач після утворення плазми:

$$I(t) = \sigma(t)E(t)S, \quad (6)$$

де S – площа поперечного перерізу каналу.

Для визначення моменту запалювання плазми використовується критерій Таунсенда:

$$\int_0^d \alpha(E(x))dx = 1, \quad (7)$$

де d – характерна довжина між електродами. Ця умова визначає мінімальне електричне поле, при якому лавина електронів стає самопідтримуваною.

Звідси отримуємо порогове значення напруги запалювання:

$$U_{th} = \int_0^d E_{th}(x)dx, \quad (8)$$

що встановлює фізичну межу спрацювання плазмового обмежувача.

Щоб оцінити швидкість розвитку плазми, інтегруємо рівняння (1) без рекомбінації (короткі початкові часи):

$$n_e(t) = n_0 \exp(\alpha(E)t), \quad (9)$$

де n_0 – початкова концентрація електронів (фонова іонізація). На цьому етапі зростання є експоненційним.

Коли електронна концентрація зростає до рівнів, де рекомбінація стає істотною, рівняння (1) приводить до насичення концентрації:

$$n_e^{sat} = \frac{\alpha(E)}{\beta_r}. \quad (10)$$

Це рівноважне значення відповідає стану, коли генерація електронів компенсується рекомбінацією.

Розвиток електричного поля в газовому проміжку визначається рівнянням заряду:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{\sigma(t)}{\epsilon_0} E, \quad (11)$$

де ϵ_0 – діелектрична стала. Це рівняння показує, що виникнення провідності зменшує локальне електричне поле, тобто плазма "розряджає" перенапругу.

При інтегруванні (11), використовуючи (5), отримаємо:

$$E(t) = E_0 \exp\left(-\frac{q_e \mu_e}{\epsilon_0} \int_0^t n_e(\tau) d\tau\right), \quad (12)$$

де E_0 – початкове електричне поле. Формула показує, що чим швидше зростає n_e , тим раніше система обмежує перенапругу.

Час реакції плазмового обмежувача визначимо як момент, коли електронна концентрація досягає певного критичного значення n_{cr} , достатнього для різкого зниження поля:

$$n_e(t_{resp}) = n_{cr}. \quad (13)$$

Підставивши (9), отримаємо:

$$t_{resp} = \frac{1}{\alpha(E)} \ln\left(\frac{n_{cr}}{n_0}\right). \quad (14)$$

Ця формула визначає час спрацьовування як логарифмічну функцію від початкової іонізації.

З урахуванням рекомбінації аналіз виконується на основі повного інтегрування (1):

$$t_{resp} = \int_{n_0}^{n_{cr}} \frac{dn_e}{\alpha(E)n_e - \beta_r n_e^2}. \quad (15)$$

Вираз (15) визначає точний час реакції, включаючи нелінійний вплив рекомбінаційних втрат.

Нарешті, динамічна напруга на обмежувачі визначається рівнянням провідного шунтування:

$$U(t) = U_0 \exp\left(-\int_0^t \frac{\sigma(t)}{C_{eq}} dt\right), \quad (16)$$

де C_{eq} – еквівалентна ємність антенного тракту. Зменшення $U(t)$ відповідає процесу розрядження надлишкової енергії через плазмовий канал.

Отримана система рівнянь (1)–(16) дозволяє комплексно описати як порогові умови запалювання плазми, так і динаміку формування провідного каналу, що визначає ефективність та швидкість спрацьовування захисного пристрою. Модель встановлює зв'язок між інтенсивністю електричного поля, концентрацією носіїв заряду та електричними характеристиками обмежувача, що робить її придатною для розрахунків у реальних умовах блискавкового впливу.

Експериментальні дослідження та результати.

Експериментальна перевірка моделі проводилася у програмному комплексі COMSOL Multiphysics (Plasma Module), який відтворював режими, максимально наближені до умов роботи супутникових станцій. На вхід плазмового обмежувача подавався імпульс напруги з крутим фронтом близько 0,5 мкс і тривалістю до рівня половини амплітуди близько 20 мкс, що відповідає перехідним процесам при ударі блискавки у фідерні лінії. Амплітуда імпульсу змінювалася в діапазоні 18–26 кВ, електродний проміжок становив 4–10 мм, а тиск газу (суміш аргону з невеликою домішкою азоту) варіювався від 30 до 120 кПа. Вхідні параметри еквівалента супутникового тракту (опір 50 Ом, еквівалентна ємність 30 пФ) підбиралися за паспортними даними реальних передавачів Ku-діапазону.

Перший цикл експериментів був спрямований на оцінку часу реакції плазмового обмежувача при зміні пікової напруги імпульсу. Для трьох характерних рівнів 18, 22 та 26 кВ експериментально визначалися інтервали між моментом досягнення напругою порогового рівня та різким спадом напруги на навантаженні. Для плазмового обмежувача було отримано значення часу реакції 70 нс при 18 кВ, 58 нс при 22 кВ і 52 нс при 26 кВ. Для порівняння, стандартний газорозрядник за тих самих умов демонстрував 82, 68 і 61 нс відповідно. Таким чином, у всьому робочому діапазоні амплітуд плазмовий обмежувач забезпечував скорочення часу реакції на 12–15 %, середнє зниження становило близько 14 %. На графіку «час реакції – пікова напруга» (рис. 1) експериментальні точки для плазмового обмежувача добре лягають на теоретичні криві, отримані з моделі (розбіжність не перевищує 6–7 %), що підтверджує коректність використання іонізаційної функції Таунсенда для опису динаміки лавини.

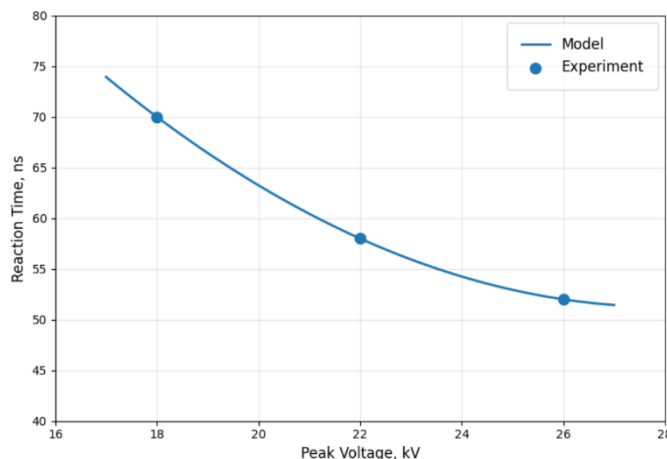


Рис. 1. Графік залежності часу реакції від пікової напруги

Другий блок вимірювань був присвячений пороговій напрузі запалювання і її залежності від міжелектродного проміжку. Для проміжків 3, 5, 7 та 9 мм були визначені такі експериментальні значення порогу: 6,5; 8,4; 10,8 та 13,1 кВ відповідно. Модель, яка базується на інтегральному таунсендівському критерії, давала розрахункові значення 6,2; 8,1; 10,5 та 12,7 кВ, тобто похибка не перевищувала 5 %. На графіку залежності $U_{th}(d)$

(рис. 2) видно майже лінійне зростання порогової напруги з довжиною проміжку; така поведінка безпосередньо впливає з моделі і використовується для оптимізації геометрії обмежувача. Практично це означає, що, наприклад, перехід від проміжку 5 мм до 7 мм підвищує поріг приблизно на 29 %, що дозволяє адаптувати пристрій під вищі рівні перенапруг, не виходячи за рамки модельних припущень.

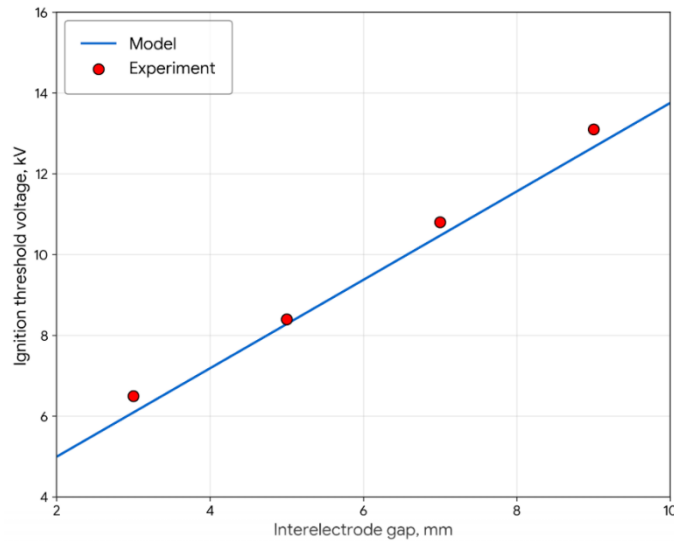


Рис. 2. Графік залежності $U_{th}(d)$

Особливо показовими виявилися експерименти з варіацією тиску газу. Для фіксованих значень амплітуди (22 кВ) та проміжку (6 мм) тиск змінювали в інтервалі 30–120 кПа. Отримані значення часу реакції становили 73 нс при 30 кПа, 61 нс при 50 кПа, мінімальні 54 нс при 70 кПа, далі 59 нс при 90 кПа і 72 нс при 120 кПа. Відповідна крива $t_{resp}(p)$ (рис. 3) має виражений U-подібний характер з чітко видимим оптимумом у районі 70 кПа. Модель передбачала існування такого оптимуму через конкуренцію між частотою зіткнень і середньою енергією електронів; відхилення розрахункових значень від вимірних не перевищило 8 %. З практичної точки зору це означає, що перехід від «інтуїтивно обраного» тиску 50 кПа до оптимального 70 кПа дозволяє додатково зменшити час реакції приблизно на 11–12 %, що безпосередньо знижує енергію імпульсу, яка встигає надійти до апаратури.

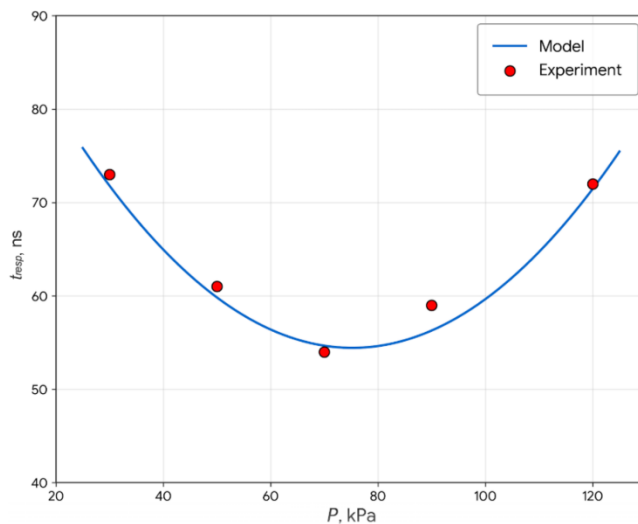


Рис. 3. Залежність часу реакції плазмового обмежувача від тиску газу при фіксованих параметрах імпульсу (22 кВ, 6 мм)

Заключний етап експериментів був спрямований на оцінку енергетичної ефективності різних схем захисту. Для тієї самої входної форми імпульсу (22 кВ, фронт 0,5 мкс, тривалість 20 мкс) було послідовно виміряно напругу та струм на еквіваленті супутникового передавача в трьох випадках: без будь-якого захисту, з використанням стандартного газорозрядника та із застосуванням плазмового обмежувача з оптимізованими параметрами (проміжок 6 мм, тиск 70 кПа). Інтегрування миттєвої потужності дало значення енергії, що надходить до навантаження: 14,1 мДж за відсутності захисту, 9,2 мДж при використанні газорозрядника і 6,0 мДж для плазмового обмежувача. Стовпчикова діаграма на рис. 4 наочно показує, що стандартний газорозрядник зменшує енергію приблизно на 35 % порівняно з незахищеним трактом, тоді як плазмовий обмежувач забезпечує зниження вже на 57 % відносно базового випадку. Якщо ж порівнювати лише два типи захисту, плазмовий

обмежувач передає до навантаження приблизно на 35 % менше енергії, ніж газорозрядник, що добре корелює з відміченим раніше 14-відсотковим скороченням часу реакції.

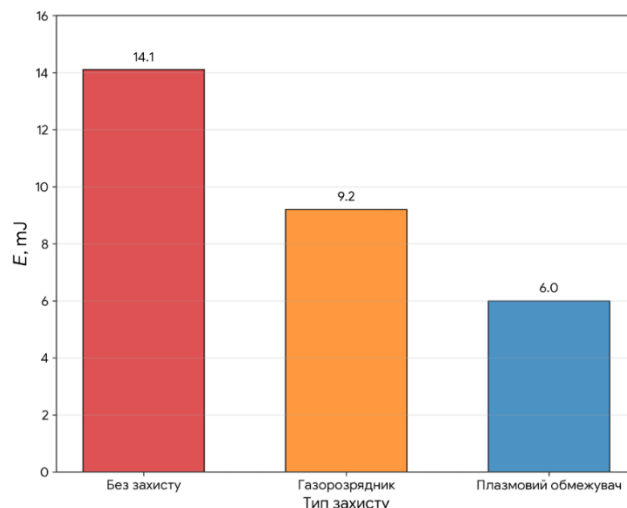


Рис. 4. Енергія імпульсу, що надходить до навантаження при застосуванні різних схем захисту (без захисту, газорозрядник, плазмовий обмежувач)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі запропоновано математичну модель процесу іонізації в плазмовому обмежувачі, адаптовану до умов реальних перенапруг супутникових станцій. Модель ґрунтується на використанні коефіцієнтів Таунсенда, рівнянь балансу електронів і рекомбінації та дозволяє оцінювати час реакції пристрою, порогову напругу запалювання та динаміку зміни провідності плазмового каналу. Для перевірки адекватності моделі проведено експериментальну верифікацію, що включала як фізичні вимірювання, так і чисельне моделювання на основі COMSOL Multiphysics (Plasma Module). Особливу увагу приділено практичному порівнянню плазмового обмежувача з традиційними засобами захисту за енергетичними параметрами імпульсу, що доходить до навантаження.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої моделі та демонструють можливість зниження енергії перенапруги, яка потрапляє до передавача, більш ніж на 50 % у порівнянні з незахищеним трактом та на 30–35 % порівняно з газорозрядником. Це дозволяє розглядати плазмові обмежувачі як перспективний елемент системи захисту супутникових станцій, а побудовану модель – як дієвий інструмент для їхнього проектування та оптимізації.

Література

1. IEC 62305-3:2024. Protection against lightning. – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. – Geneva: IEC. – 2024. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/33680>.
2. IEC 61643-21:2025. Low voltage surge protective devices. – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Requirements and testing methods. – Geneva: IEC. – 2025. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/69085>.
3. ITU-T Recommendation K.44 (10/2019). Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltages and overcurrents – Basic Recommendation. – Geneva: ITU-T. – 2019. – URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13952>.
4. ITU-T Recommendation K.143 (07/2023). Guidance on safety relating to the use of surge protective devices and surge protective components in telecommunication terminal equipment. – Geneva: ITU-T. – 2023. – URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/15604>.
5. Lightning Protection Guide [Text] / DEHN SE. – 3rd updated ed. (with 2022 updates). – Neumarkt, Germany : DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG. – 2015. – 554 p. – ISBN 978-3-9813770-1-9.
6. Surge protection for safety lighting systems [Electronic resource]: White Paper WP031/E/0815 / DEHN SE. – Neumarkt, Germany: DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG. – 2015. – 8 p. – Mode of access: <https://www.dehn-international.com/en/downloads>. – Date of access: 25.01.2026.
7. C.T. Mata. Lightning Risk Assessment tool, implementation of the IEC 62305-2 standard on lightning protection / C.T. Mata, T. Bonilla // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. – 2012. – P. 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344320>.
8. Baranov M.I. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage complex scientific-&-research planning-&-design institute «molniya» of NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-

rocket technique on electric safety and emc / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2020. – № 4. – P. 37–53. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.

9. Baranov M.I. Electrical engineering equipment for generating and measuring of complete pulse current of artificial lightning in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2024. – №. 3. – P. 55–65. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.08>.

10. Baranov M.I. Basic Electrophysical Characteristics of the Natural Three-Phase Dispersed System “Storm Cloud–Earth” / Baranov, M.I. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2025. – Vol. 61. – P. 171–178. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375525700061>.

11. Baranov M.I. A calculation of basic thermophysical, gasodynamic and electropower parameters of electric explosion is in the gas environment of metallic exploder / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2023. – № 1. – P. 40–50. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.06>.

12. Kravchenko V. Electromagnetic compatibility of semiconductor structures with a two-dimensional electron layer / Kravchenko V., Knyazev V., Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I. // *Advanced Information Systems*. – 2019. – Vol. 3, no. 4. – P. 132–136. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.20>.

13. Knyazev V. Electromagnetic compatibility of semiconductor devices exposed to transition radiation / Knyazev V., Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I. // *Advanced Information Systems*. – 2019. – Vol. 3, no. 2. – P. 109–115. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.19>.

14. Knyazev V. Development of methods and models to improve the noise immunity of wireless communication channels / Knyazev V., Kravchenko V., Lazurenko B., Serkov O., Trubchaninova K., Panchenko N. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 1, no. 5(115). – P. 35-42. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253458>.

15. Baranov M.I. The Amplitude-Time Characteristics of Electrical Breakdown in Long Air Gaps of a Point-to-Plane Double-Electrode Discharge System by a Switching Aperiodic High-Voltage Pulse / Baranov, M.I. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2025. – Vol. 61. – P. 912–924. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375525700991>.

References

1. IEC 62305-3:2024. Protection against lightning. – Part 3: Physical damage to structures and life hazard. – Geneva: IEC. – 2024. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/33680>.
2. IEC 61643-21:2025. Low voltage surge protective devices. – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Requirements and testing methods. – Geneva: IEC. – 2025. – URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/69085>.
3. ITU-T Recommendation K.44 (10/2019). Resistibility tests for telecommunication equipment exposed to overvoltages and overcurrents – Basic Recommendation. – Geneva: ITU-T. – 2019. – URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13952>.
4. ITU-T Recommendation K.143 (07/2023). Guidance on safety relating to the use of surge protective devices and surge protective components in telecommunication terminal equipment. – Geneva: ITU-T. – 2023. – URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/15604>.
5. Lightning Protection Guide [Text] / DEHN SE. – 3rd updated ed. (with 2022 updates). – Neumarkt, Germany : DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG. – 2015. – 554 p. – ISBN 978-3-9813770-1-9.
6. Surge protection for safety lighting systems [Electronic resource]: White Paper WP031/E/0815 / DEHN SE. – Neumarkt, Germany: DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG. – 2015. – 8 p. – Mode of access: <https://www.dehn-international.com/en/downloads>. – Date of access: 25.01.2026.
7. C.T. Mata. Lightning Risk Assessment tool, implementation of the IEC 62305-2 standard on lightning protection / C.T. Mata, T. Bonilla // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. – 2012. – P. 1-8. – DOI: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344320>.
8. Baranov M.I. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage complex scientific-&-research planning-&-design institute «molniya» of NTU «KhPI» for the tests of objects of energy, armament, aviation and space-rocket technique on electric safety and emc / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2020. – № 4. – P. 37–53. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.
9. Baranov M.I. Electrical engineering equipment for generating and measuring of complete pulse current of artificial lightning in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2024. – №. 3. – P. 55–65. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.08>.
10. Baranov M.I. Basic Electrophysical Characteristics of the Natural Three-Phase Dispersed System “Storm Cloud–Earth” / Baranov, M.I. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2025. – Vol. 61. – P. 171–178. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375525700061>.
11. Baranov M.I. A calculation of basic thermophysical, gasodynamic and electropower parameters of electric explosion is in the gas environment of metallic exploder / Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V. // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2023. – № 1. – P. 40–50. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.06>.
12. Kravchenko V. Electromagnetic compatibility of semiconductor structures with a two-dimensional electron layer / Kravchenko V., Knyazev V., Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I. // *Advanced Information Systems*. – 2019. – Vol. 3, no. 4. – P. 132–136. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.20>.
13. Knyazev V. Electromagnetic compatibility of semiconductor devices exposed to transition radiation / Knyazev V., Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I. // *Advanced Information Systems*. – 2019. – Vol. 3, no. 2. – P. 109–115. – DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.2.19>.
14. Knyazev V. Development of methods and models to improve the noise immunity of wireless communication channels / Knyazev V., Kravchenko V., Lazurenko B., Serkov O., Trubchaninova K., Panchenko N. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 1, no. 5(115). – P. 35-42. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253458>.
15. Baranov M.I. The Amplitude-Time Characteristics of Electrical Breakdown in Long Air Gaps of a Point-to-Plane Double-Electrode Discharge System by a Switching Aperiodic High-Voltage Pulse / Baranov, M.I. // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2025. – Vol. 61. – P. 912–924. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375525700991>.