

М.І. Баранов

Узагальнений фізичний принцип розвитку плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду в діелектрику

Надані результати розробки узагальненого фізичного принципу розвитку в гомогенному діелектричному середовищі плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду. Показано, що канал даного виду електричного розряду в газовому діелектрику розповсюджується по зигзагоподібному шляху завдовжки l_c , який забезпечує найменше падіння на ньому електричної напруги U_c . Для обґрунтування прийнятих початкових фізичних положень і верифікації отриманих розрахункових електрофізичних даних представлені результати високовольтних сильнотрумових експериментів по електричному пробую довгого повітряного проміжку в двоелектродній розрядній системі «вістря-площина» ($l_{\min}=1,5$ м) із застосуванням стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності. Виконано порівняння розробленого фізичного принципу розповсюдження плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в діелектричному середовищі з фундаментальним фізичним принципом (законом) Ферма для розповсюдження світла в оптично прозорому середовищі, яке вказує на схожість за формою математичного запису і близькість за змістовним призначенням даних фізичних принципів. Бібл. 25, рис. 5.

Ключові слова: плазмовий канал, іскровий розряд, діелектричне середовище, фізичний принцип розвитку плазмового каналу, розрахунок, експеримент.

Стан та актуальність задачі. Електричний імпульсний іскровий розряд у вакуумі, газовому, рідкому та твердому діелектричних середовищах, який здійснюється за допомогою високовольтного слабко- і сильнотрумового електроустаткування, знайшов досить широке практичне застосування як в наукових, так і технологічних цілях [1-5]. Вкажемо, що даний вид високовольтного електричного розряду відноситься до одного з відомих і добре вивчених на сьогодні в електрофізиці класичних видів самостійного розряду в діелектрику [6-8]. Електророзрядні технології, що базуються на перетворенні накопиченої, як правило, в потужних високовольтних конденсаторних батареях електричної енергії в енергію фазових переходів, хімічних реакцій, вибуху твердих речовин, ударних хвиль, в механічну роботу, теплоту та інші види енергії [3, 9-11], мають одну принципову відмінність від інших технологій: вони здатні забезпечити підведення до досліджуваної речовини або оброблюваного виробу (об'єкту) великої густини енергії в імпульсному режимі її дії. При цьому час цієї дії може змінюватися в широкому діапазоні: від сотень мілісекунд до одиниць наносекунд. Враховуючи перспективність електророзрядних технологій на основі імпульсного іскрового розряду, в останні десятиліття вітчизняними і зарубіжними вченими-електротехніками і електрофізиками були отримані наступні важливі наукові результати в даній області високовольтної імпульсної техніки (ВІТ) [1, 3-12]: дані щодо залежності електричної міцності багатьох діелектриків від довжини міжелектродних проміжків, геометрії вживаних в цих проміжках електродів з різних металів і провідних композицій, амплітудно-часових параметрів (АЧП) електричної напруги (струму), що діє на діелектрик, і електрофізичних параметрів навколишнього діелектричного ізоляційного середовища; вольт-секундні характеристики електричного пробую багатьох видів діелектриків; знайдені розподіли напруженості сильного імпульсного електричного поля в лінійних і неоднорідних діелектриках, розміщених в міжелектродних проміжках з електродами різної конфігурації; визначені основні види електророзрядних структур і параметри розрядних плазмових каналів в основних видах діелектриків при різ-

них АЧП напруги (струму); отримані перші адекватні розрахункові дані по комп'ютерному моделюванню складних електрофізичних процесів розвитку плазмового каналу електричного імпульсного іскрового розряду в деяких видах діелектриків.

Незважаючи на вказані вище наукові результати, в області сучасної ВІТ при дослідженні імпульсного іскрового розряду в діелектриках маловивченими питаннями залишилися ті, що пов'язані з розробкою механізмів і описом розрахункових аналітичних моделей розвитку в них плазмового каналу цього розряду. Наявність подібних механізмів і аналітичних моделей сприятиме подальшому удосконаленню методів комп'ютерного моделювання розвитку плазмового каналу електричного іскрового розряду в діелектриках різної природи [13-18], що мають важливе прикладне значення в області високовольтної електротехніки, промислової електроенергетики, ВІТ, сильнотрумової електроніки, атомної техніки і захисту літаків та наземних об'єктів інфраструктури від вражаючої дії атмосферної електрики (блискавки).

Метою статті є отримання узагальненого фізичного принципу розвитку плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду в гомогенному діелектрику різного агрегатного стану.

1. Постановка задачі. Для визначеності вирішення даної прикладної електрофізичної задачі розглянемо високовольтну двоелектродну розрядну систему (ДЕРС), що містить потенційний електрод у формі загостреного на краю металевого стрижня 1 кінцевих геометричних розмірів і заземлений електрод у вигляді металеві площини 2 необмежених геометричних розмірів (рис. 1). Хай електричні потенціали цих електродів 1 і 2 рівні відповідно φ_1 і $\varphi_2=0$, а між ними у міжелектродному повітряному проміжку мінімальною довжиною l_{\min} , рівній довжині прямої, проведеної від вістря потенційного електроду 1 за нормаллю до плоскої поверхні заземленого електроду 2, розміщений гомогенний газ за наступних атмосферних умов [19]: тиск газу $P_a \approx (1,013 \pm 0,003) \cdot 10^5$ Па; абсолютна температура газу $T_a \approx (293,15 \pm 5)$ К; відносна вологість

© М.І. Баранов

газу (45±15) %. Прийемо, що електрична міцність міжелектродного повітряного проміжку в ДЕРС стосовно усередненого рівня його пробивної напруженості сильного імпульсного електричного поля для імпульсу електричної напруги, що подається на ДЕРС, складає величину, яка дорівнює E_d . При цьому потенціал φ_1 набуває значення, рівного φ_{1d} .

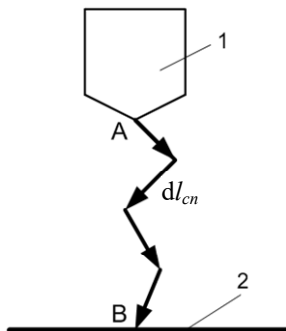


Рис. 1. Схематичне зображення повітряної ДЕРС, на прикладі якої розглядається процес розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в газовому діелектрику (1, 2 – відповідно металевий стрижень з потенціалом φ_1 і металева площина з потенціалом φ_2 ; A, B – точки початку і завершення шляху просторового розвитку плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в газовому діелектрику)

Обмежимося розглядом прикладного випадку, коли АЧП високої електричної імпульсної напруги $U_{12}(t)=(\varphi_1-\varphi_2)$ у міжелектродному повітряному проміжку ДЕРС змінюються у часі t за законом стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми $T_m/T_d \approx (250 \pm 50) \text{ мкс} / (2500 \pm 750) \text{ мкс}$ позитивної полярності з відповідними допусками на його параметри [20, 21]. Саме цей вид високої імпульсної напруги найчастіше використовується в промисловій електроенергетиці і ВІТ при визначенні електричної міцності внутрішньої і зовнішньої ізоляції різного високовольтного електроустаткування і потужних високовольтних випробувальних електрофізичних устаткувань. Враховуючи лідерну стадію розвитку плазмового каналу електричного розряду в газовому діелектрику, коли канал розряду може розгалужуватися і мати зигзагоподібний характер [8], обмежимося розглядом процесів на стадії утворення провідного імпульсного іскрового каналу в повітряній ДЕРС після проходження по лідерному каналу зворотної хвилі імпульсного струму, яка викликає його яскраве свічення [5]. На основі аналізу розрахункових і експериментальних даних, які стосуються протікання основних електрофізичних процесів в досліджуваному розрядному повітряному проміжку ДЕРС (див. рис. 1), необхідно розробити фізичний принцип розвитку плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду в прийнятному для дослідження газовому діелектрику і далі узагальнити його на гомогенні діелектрики іншого агрегатного стану, фізичні властивості яких змінюються у просторі безперервно без стрибків.

2. Основні фізичні положення і розрахункові співвідношення. Враховуючи електромагнітну природу світла і плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду, що яскраво світиться, в досліджуваному газовому діелектрику [8, 19], для

кращого розуміння складних електрофізичних процесів в повітряній ДЕРС, яка розглядається, зупинимося спочатку на відомому фізичному принципі Ферма з області геометричної оптики, який для оптичної довжини L_0 реального світлового променя в оптично прозорому середовищі записується в наступному класичному аналітичному вигляді [22]:

$$L_0 = \int_A^B n_0 ds, \quad (1)$$

де n_0 – безрозмірний показник заломлення світлового променя, який є мінімальним для реального променя у оптично прозорому середовищі; ds – довжина елементарної ділянки розповсюдження світлового променя у оптично прозорому середовищі від точки початку A до точки завершення B реального шляху розповсюдження в ньому світла.

У випадку, коли показник заломлення n_0 середовища просторово змінюється в ньому безперервно, то згідно (1) оптична довжина L_0 шляху, який пройдений в ньому реальним світловим променем від точки A до точки B, буде менше оптичної довжини будь-якого іншого шляху або довжини будь-якої іншої геометричної кривої, що з'єднують ці крайні точки шляху розповсюдження світлового променя. Отже і час t_0 проходження в тому або іншому середовищі з показником заломлення n_0 світлового променя цього шляху з оптичною довжиною L_0 буде найменшим. При цьому слід зазначити, що вказаний час t_0 проходження променя матиме наступний розрахунковий аналітичний вигляд: $t_0=L_0/c$, де $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – швидкість розповсюдження світла у вакуумі [19]. Відмітимо, що згідно закону Максвелла для величини показника заломлення n_0 середовища є справедливою формула [22]:

$$n_0 = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}, \quad (2)$$

де ε_r, μ_r – відповідно відносні діелектрична та магнітна проникності середовища, у якому розповсюджується світловий промінь.

Формула (2) чітко вказує на електромагнітну природу світла. З (2) для повітряного середовища ($\varepsilon_r=1; \mu_r=1$) витікає, що фізичний параметр n_0 в цьому прикладному випадку чисельно складає біля $n_0=1$ [19].

В зв'язку з цим фізичний принцип Ферма, який є загальним законом геометричної оптики, згідно (1) і прийнятим положенням в області сучасної оптики формулюється таким чином [22]: «Світло розповсюджується з однієї точки середовища в іншу за шляхом, для проходження якого витрачається найменший час». З принципу Ферма витікає фізичне положення про те, що світло в оптично прозорому середовищі розповсюджується прямолінійно [22]. Зважаючи на зазначену вище електромагнітну природу світла і плазмового каналу електричного розряду, можна достатньо обґрунтовано прийняти те фізичне положення, що розвиток плазмового лідерного каналу електричного розряду і далі плазмового іскрового каналу даного імпульсного розряду в повітряному розрядному проміжку ($n_0=1$) досліджуваної ДЕРС на його коротких елементарних ділянках завдовжки $dl_{cn} \ll l_{\min}$ відбувається за прямолінійними напрямками тій або іншій просторовій орієнтації. Причому, дані прямолі-

нійні напрями на елементарних ділянках довжиною dl_{cn} , як на стадії розвитку в повітрі плазмового лідерного каналу розряду, так і на стадії розвитку в ньому його іскрового каналу, задовольнятимуть умові максимального значення питомої електропровідності γ_{cn} провідного шляху в газовому діелектрику на вказаних елементарних ділянках довжиною dl_{cn} плазмового лідерного (іскрового) каналу розряду.

Вважаємо, що цей провідний шлях ініціюється проростаючою в просторі його головною частиною (головкою лідера розряду), що яскраво світитися і швидко рухається в цьому діелектрику (при середній швидкості v_L просування в повітрі переднього фронту лідера розряду $v_L \approx 10^5$ м/с [8]) від потенційного до заземленого електродів ДЕРС. Просторові розподіли в розрядному проміжку досліджуваної ДЕРС значень γ_{cn} на елементарних ділянках довжиною dl_{cn} проростаючого лідерного каналу імпульсного розряду носять, як правило, імовірнісний характер. Дані просторові імовірнісні розподіли значень γ_{cn} в тому або іншому діелектрику визначаються як технологією їх виготовлення (більше це стосується твердої і рідкої ізоляції), так і фізичним станом і складом газового діелектрика, а також властивостями газового або рідкого ізоляційного середовища, що оточує твердий діелектрик [1, 5]. Тому при електричному пробіті повітряного розрядного проміжку в досліджуваній ДЕРС з провідним плазмовим каналом імпульсного

розряду сумарною довжиною $l_c = \sum_{n=1}^m dl_{cn} = \int_A^B dl_{cn}$ вказані

прямолінійні елементарні ділянки завдовжки dl_{cn} плазмового лідерного каналу імпульсного електричного розряду, що швидко проростає в повітрі, утворюватимуть ламану зигзагоподібну криву реального шляху ($l_c > l_{\min}$) досліджуваного імпульсного іскрового розряду в ДЕРС між точками початку A і завершення B розвитку плазмового каналу даного виду електричного розряду (див. рис. 1).

Виходячи із закону Ома у диференціальній формі [22], для прямолінійної елементарної ділянки довжиною dl_{cn} (див. рис. 1) провідного плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС, якій відповідає питома електропровідність γ_{cn} газового діелектрика, можна записати наступне співвідношення:

$$dl_{cn} = \gamma_{cn} \delta_{cn}^{-1} dU_{cn}, \quad (3)$$

де δ_{cn} – густина розрядного струму в каналі високовольтного повітряного електричного іскрового розряду на його елементарній ділянці завдовжки dl_{cn} ; dU_{cn} – падіння електричної напруги на елементарній ділянці довжиною dl_{cn} плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду в повітряній ДЕРС.

Тоді з (3) для сумарної довжини l_c плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС в загальному вигляді отримуємо:

$$l_c = \int_A^B dl_{cn} = \int_A^B \gamma_{cn} \delta_{cn}^{-1} dU_{cn}. \quad (4)$$

У разі безперервної зміни в плазмовому каналі повітряного імпульсного іскрового розряду значення питомої електропровідності γ_{cn} його прямолінійних елементарних ділянок довжиною dl_{cn} і незмінності густини $\delta_{cn} \approx \delta_c$ розрядного струму уздовж плазмового іскрового каналу вираз (4) має наступний вигляд:

$$l_c = \delta_c^{-1} \int_A^B \gamma_{cn} dU_{cn}. \quad (5)$$

Максимальні значення питомої електропровідності γ_{cn} низькотемпературної плазми, як з початку лідерного каналу, так і далі іскрового каналу повітряного розряду в ДЕРС на його прямолінійних елементарних ділянках довжиною dl_{cn} , відповідатимуть їх мінімальним електричним опорам. В зв'язку з цим плазмовий лідерний (іскровий) канал імпульсного розряду в повітряній ДЕРС буде просторово проростатиме (розвиватися) туди, де ним і діелектриком, що знаходиться під дією зовнішнього сильного електричного поля лідера розряду, забезпечуватиметься мінімальне значення падіння електричної напруги $U_c = \int_A^B dU_{cn}$. У

наближенні виконання рівності $\gamma_{cn} \approx \gamma_c$, що задовольняє найбільшим поточним значенням γ_{cn} на шляху розповсюдження у газі лідерного (іскрового) каналу розряду, формула (5) для реального шляху розвитку високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в повітряному діелектрику набуває вигляду:

$$l_c = \gamma_c \delta_c^{-1} \int_A^B dU_{cn}. \quad (6)$$

У відомій формулі (1) інтеграл $\int_A^B n_0 ds$ визначає

мінімальне значення оптичної довжини L_0 реального світлового променя в оптично прозорому середовищі. В отриманій формулі (6) мінімальне значення інтеграла $\int_A^B dU_{cn} = l_c \delta_c / \gamma_c$, яке відповідає максимальному значенню γ_c , визначає мінімальне значення сумарної довжини $l_c = \int_A^B dl_{cn}$ реального плазмового каналу іскрового розряду у його конкретних умовах просторового розвитку в газовому діелектрику. Тому при розгляді електричного розряду в газі можна говорити про те, що для електрофізичного процесу розвитку в газовому діелектрику високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду також виконуються фізичні закони мінімізації його основних характеристик, які приводять до мінімізації витрат енергії на підтримку протікання в ньому такого процесу.

Бачимо, що запропонована формула (6) для розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в газовому діелектрику за математичною формою і призначенням близька до класичної формули (1) для розповсюдження світла в оптично прозорому середовищі. Із порівняння отриманої формули (6) для сумарної довжини l_c реального

шляху розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в повітряній ДЕРС при електричному пробі її проміжку і формули (1), що відповідає фізичному принципу Ферма, який визначає мінімальну оптичну довжину L_0 при розповсюдженні реального світлового променя в оптично прозорому середовищі, можна зробити висновок, що сумарна довжина l_c реального плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в повітряному діелектрику між точками його початку A і завершення B відповідає мініальному па-

$$dінню на ній електричної напруги $U_c = \int_A^B dU_{cn}$.$$

Враховуючи вищевикладене, запропонований фізичний принцип розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду стосовно досліджуваної повітряної ДЕРС можна сформулювати в наступному вигляді: «Плазмовий канал імпульсного іскрового розряду в газовому діелектрику розповсюджується від його однієї точки до іншої за шляхом завдовжки l_c , який забезпечує найменше падіння на ньому електричної напруги U_c ». Для розрахункової кількісної оцінки з урахуванням запропонованої формули (6) падіння електричної напруги

$$U_c = \int_A^B dU_{cn}$$
 на сумарній довжині l_c реального шляху

розвитку в гомогенному газовому діелектрику досліджуваної ДЕРС плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду скористаємося наступним наближенням співвідношенням з області ВІТ [5]:

$$l_c \approx (\varphi_{1d} - \varphi_2) / E_d. \quad (7)$$

При $\varphi_2=0$ з (6) і (7) для падіння електричної напруги U_c на сумарній довжині l_c реального шляху розвитку в газовому діелектрику плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в прийнятому наближенні отримуємо вираз:

$$U_c \approx \int_A^B dU_{cn} \approx \delta_c \varphi_{1d} / (\gamma_c E_d). \quad (8)$$

Підставивши у формулу (8) розрахунково-експериментальні чисельні дані для сильнотривого плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі ($\delta_c \approx 5,8 \cdot 10^7$ А/м²; $\gamma_c \approx 1625$ (Ом·м)⁻¹; $\varphi_{1d} \approx 611,6$ кВ; $E_d \approx 400$ кВ/м), отриманого автором в електричному колі потужного високовольтного випробувального електроустаткування [23-25], що містить досліджувану ДЕРС ($l_{\min}=1,5$ м), знаходимо, що шукане значення падіння електричної напруги U_c на сумарній довжині $l_c > l_{\min}$ реального шляху розвитку в прийнятому повітряному середовищі плазмового каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду чисельно складає приблизно $U_c \approx 54,6$ кВ. Як бачимо,

$$U_c = \int_A^B dU_{cn} \ll (\varphi_{1d} - \varphi_2).$$
 Отримане з (8) розрахункове

чисельне значення падіння електричної напруги $U_c \approx 54,6$ кВ на сильнотривому плазмовому каналі повітряного імпульсного іскрового розряду не перевищує 9 % від рівня пробивної електричної напруги

$U_{12d}(t) \approx \varphi_{1d} \approx 611,6$ кВ ($\varphi_2=0$) у даній ДЕРС. Це розрахункове значення $U_c \approx 54,6$ кВ добре корелює з експериментальним результатом для $U_c \approx I_{mc} R_{c0} l_{\min} \approx 53,6$ кВ, приведеним автором в [24] стосовно високовольтного сильнотривого імпульсного іскрового розряду в ДЕРС «вістря-площина» з довгим повітряним проміжком ($l_{\min}=1,5$ м; амплітуда імпульсного розрядного струму $I_{mc} \approx 213,9$ кА, яка відповідає часу $t_{mc} \approx 38$ мкс, при електричному пробі повітряного проміжку в цій ДЕРС; погонний активний опір $R_{c0} \approx 0,167$ Ом/м плазмового каналу повітряного іскрового розряду в ДЕРС). На достовірність цих дослідних результатів вказують виконані автором для даного прикладного електрофізичного випадку розрахункові оцінки деяких параметрів (наприклад, максимального радіусу $r_{mc} \approx 34,27$ мм плазмового каналу іскрового розряду в атмосферному повітрі; амплітуди густини струму δ_{mc} в каналі розряду $\delta_{mc} \approx I_{mc} / (\pi r_{mc}^2) \approx 5,79 \cdot 10^7$ А/м²; значення питомої електропровідності γ_c його низькотемпературної плазми $\gamma_c \approx (\pi r_{mc}^2 R_{c0})^{-1} \approx 1624$ (Ом·м)⁻¹) електророзрядних процесів в досліджуваному сильнотривому плазмовому каналі імпульсного іскрового розряду в повітряній ДЕРС з використанням формули Брагинського для радіусу r_{mc} плазмового каналу [6, 8].

Результати математичного моделювання електророзрядних процесів в гомогенних рідких і твердих діелектриках із застосуванням досліджуваної ДЕРС та існуючих механізмів їх електричного пробію [5, 7] принципово нічим (крім чисельних значень параметрів l_c , γ_c , δ_c , φ_{1d} , E_d і U_c) не відрізнятимуться від приведених вище розрахункових результатів для розвитку плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в гомогенному повітряному діелектрику ДЕРС (див. рис. 1). Тому в першому наближенні розрахункове співвідношення (6) і запропонований автором фізичний принцип розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в газі, що базується на ній, можуть бути застосовані також і для гомогенних рідких і твердих діелектриків.

3. Результати експериментального дослідження розвитку плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в повітряній ДЕРС. Для верифікації деяких отриманих наближених розрахункових результатів для електророзрядних процесів у повітряній ДЕРС були виконані відповідні експерименти з використанням потужного високовольтного сильнотривого випробувального устаткування НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» [25]. На рис. 2 приведений загальний вигляд досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» з розрядним повітряним проміжком завдовжки $l_{\min}=1,5$ м.

На рис. 3 приведена дослідна осцилограма повного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_f \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності, який діє в розрядному колі високовольтного сильнотривого випробувального електроустаткування на основі генератора ГПН-4 [25] на досліджувану ДЕРС «вістря-площина» без електричного пробію її повітряного проміжку завдовжки $l_{\min}=2$ м, а на рис. 4 – осцилограма зрізаного аналогічного високовольтного імпульсу напруги з електричним пробієм повітряного розрядного проміжку в ДЕРС «вістря-площина» завдовжки $l_{\min}=1,5$ м.



Рис. 2. Загальний вигляд повітряної ДЕРС «вістря-площина» з розрядним проміжком завдовжки $l_{\min}=1,5$ м (вістря на вертикально розміщеному сталевому електроді-стрижню діаметром 30 мм має радіус закруглення його краю ~ 1 мм; горизонтальна площина електроду розміром $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$ виконана з тонких оцинкованих сталевих листів)

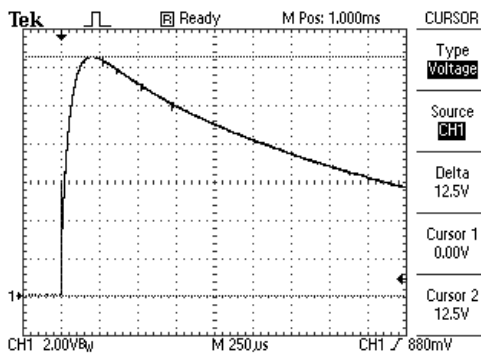


Рис. 3. Осцилограма повного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$ позитивної полярності без електричного пробою повітряного проміжку завдовжки $l_{\min}=2$ м в ДЕРС «вістря-площина» ($U_m \approx \varphi_{1m} \approx 12,5 \text{ В} \times 53650 \approx 670,6 \text{ кВ}$ – амплітуда імпульсу напруги; $T_m \approx 200 \text{ мкс}$ – час наростання імпульсу до амплітуди напруги U_m ; $T_d \approx 1990 \text{ мкс}$ – тривалість імпульсу напруги на рівні $0,5U_m$; масштаб за вертикаллю – $107,3 \text{ кВ/діл}$; масштаб за горизонталлю – 250 мкс/діл)

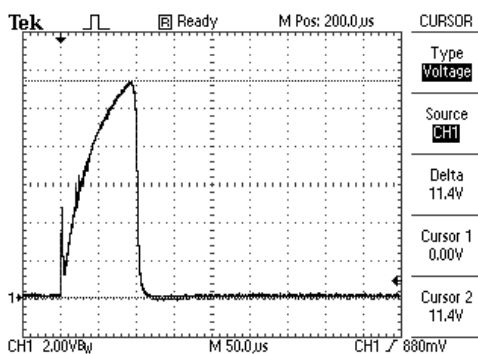


Рис. 4. Осцилограма зрізаного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$ позитивної полярності при електричному пробі повітряного проміжку завдовжки $l_{\min}=1,5$ м в ДЕРС «вістря-площина» ($U_{md} \approx \varphi_{1d} \approx 11,4 \text{ В} \times 53650 \approx 611,6 \text{ кВ}$ – рівень зрізу імпульсу напруги; $T_r \approx 95 \text{ мкс}$ – час зрізу імпульсу напруги; $T_d \approx 17 \text{ мкс}$ – тривалість зрізу імпульсу напруги, яка відповідає часу t_d розповсюдження провідного каналу лідера електричного імпульсного розряду в повітряному проміжку завдовжки l_c між її потенціальним і заземленим металевими електродами; масштаб за вертикаллю – $107,3 \text{ кВ/діл}$; масштаб за горизонталлю – 50 мкс/діл)

Вкажемо, що при вимірюванні АЧП приведених на рис. 3 і 4 високовольтних випробувальних комутаційних аперіодичних імпульсів напруги, які призначені для експериментального дослідження розвитку плазмового каналу електричного імпульсного іскрового розряду в повітряній ДЕРС «вістря-площина» (див. рис. 2), були використані омичний подільник напруги типу ОПН-2,5 (на максимальну напругу до $2,5 \text{ МВ}$ з коефіцієнтом ділення $K_d \approx 53650$ [25]) і цифровий осцилограф Tektronix TDS 1012.

На рис. 5 показаний загальний вигляд сильнотривалого плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду, що яскраво світиться в атмосферному повітрі, в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина» з довжиною повітряного розрядного проміжку $l_{\min}=1,5$ м, отриманого влітку 2023 р. при дослідному визначенні електричної міцності повітряної ізоляції завдовжки більше 1 м із застосуванням надвисоковольтного устаткування експериментального полігону НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» [25].

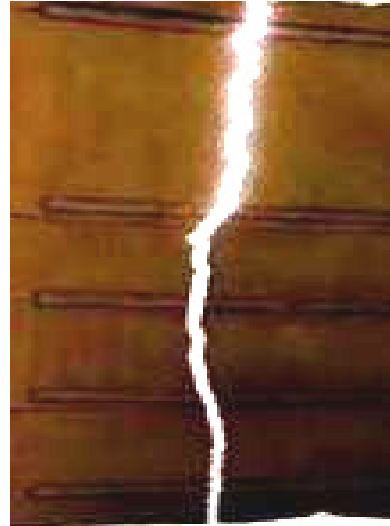


Рис. 5. Загальний вигляд сильнотривалого плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в ДЕРС «вістря-площина» з атмосферним повітрям при електричному пробі її повітряного проміжку завдовжки $l_{\min}=1,5$ м стандартним комутаційним аперіодичним імпульсом напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200 \text{ мкс}/1990 \text{ мкс}$ позитивної полярності ($U_{md} \approx \varphi_{1d} \approx 611,6 \text{ кВ}$; $T_r \approx 95 \text{ мкс}$ – час зрізу імпульсу напруги; $T_d \approx 17 \text{ мкс}$ – тривалість зрізу імпульсу напруги, яка характеризує час швидкого закорочування провідним плазмовим лідерним каналом імпульсного розряду довгого повітряного проміжку в ДЕРС)

З експериментальних даних (рис. 5) бачимо, що у використованій ДЕРС «вістря-площина» ($l_{\min}=1,5$ м; $\varphi_2=0$) реальний сильнотривалый плазмовий канал високовольтного імпульсного іскрового розряду в повітрі за нормальних атмосферних умов [19] характеризується зигзагоподібною геометричною формою ($l_c > l_{\min}$). На це вказують і розрахункові чисельні оцінки за (6) з урахуванням (8) при $\varphi_{1d} \approx 611,6 \text{ кВ}$ і $E_d \approx 400 \text{ кВ/м}$ сумарної довжини l_c каналу іскрового розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС ($l_{\min}=1,5$ м): $l_c \approx \varphi_{1d}/E_d \approx 1,53$ м. Це однозначно свідчить про те, що при електричному пробі газового (повітряного) діелектрика головна частина плазмового лідерного каналу імпульсного розряду, що яскраво світиться, просторово проростає

в ті ділянки вказаного діелектрика, розміщеного між потенційним 1 і заземленим 2 електродами (рис. 1) досліджуваної ДЕРС, які мають найбільшу питому електропровідність γ_{cn} і відповідно найменший електричний опір в конкретних умовах здійснення такого електричного пробою даної ізоляції. В зв'язку з цим даний дослідний результат з області ВІТ вказує на достовірність прийнятого автором при розробці запропонованого фізичного принципу розвитку високовольтного плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в досліджуваному газовому діелектрику основного фізичного положення, пов'язаного з орієнтацією головної частини лідерного каналу розряду при своєму проростанні в цьому діелектрику на ті його ділянки, які характеризуються в даний момент часу найбільшою питомою електропровідністю γ_{cn} .

А раз це так, то сформульований в цій роботі стосовно газового діелектрика фізичний принцип розвитку в ньому плазмового каналу імпульсного іскрового розряду, що вказує на розповсюдження в цьому виді діелектрика спочатку лідерного і потім іскрового каналів розряду по шляху з найменшим падінням електричної напруги U_c , також підтверджується результатами виконаних з участю автора цих високовольтних сильнотривових експериментів. Крім того, отримані дослідні дані згідно рис. 4 при $U_{md} \approx (\varphi_{1d} - \varphi_2) \approx 611,6$ кВ засвідчують про те, що при використанні у досліджуваній повітряній ДЕРС «вістря-площина» ($l_{\min} = 1,5$ м; $\varphi_2 = 0$) стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності усереднена напруженість сильного електричного поля $E_d \approx \varphi_{1d}/l_c$ для атмосферного повітря у цій ДЕРС при $U_{md} \approx \varphi_{1d} \approx 611,6$ кВ і $l_c \approx 1,53$ м чисельно складає приблизно $E_d \approx 400$ кВ/м з допуском ± 3 %, який визначається, головним чином, мінімальною похибкою вимірювання випробувальної високої імпульсної напруги від потужного надвисоковольтного електроустановки за допомогою омичного подільника напруги типу ОПН-2,5 ($K_d \approx 53650$ [25]) і застосованого при цьому цифрового осцилографа Tektronix TDS 1012.

Дослідні дані згідно рис. 4 вказують також на те, що плазмовий лідерний канал електричного розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС ($l_{\min} = 1,5$ м) свій сумарний шлях довжиною $l_{cm} \geq l_c \geq 1,53$ м, де l_{cm} – максимальна довжина реального шляху газового розряду в ДЕРС, від потенційного електроду до заземленого електроду даної ДЕРС проходить по повітрю за час t_d , чисельно рівний біля $t_d \approx T_{dc} \approx 17$ мкс. Саме за час $T_{dc} \approx 17$ мкс електропровідний плазмовий лідерний канал імпульсного розряду закорочує повітряний проміжок в досліджуваній ДЕРС ($l_{\min} = 1,5$ м) і вирівнює електричні потенціали ($\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx 0$) на її металевих електродах (див. рис. 4). Згідно розробленого фізичного принципу розвитку плазмового каналу електричного імпульсного іскрового розряду в газовому діелектрику при середній швидкості v_L просування в повітрі переднього фронту лідера в каналі цього електричного розряду, кількісно рівної $v_L \approx 10^5$ м/с [8], розрахункове чисельне значення для вказаного часу t_d відносно атмосферного повітря в даній ДЕРС виявляється при $l_c \approx 1,53$ м рівним $t_d \approx l_c/v_L \approx 15,3$ мкс. Як бачимо, отримане розрахункове

чисельне значення для часового параметра $t_d \approx 15,3$ мкс відрізняється від його відповідного дослідного значення $t_d \approx T_{dc} \approx 17$ мкс згідно осцилограмі на рис. 4 для зрізаного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності при електричному пробі повітряного проміжку завдовжки l_c в ДЕРС «вістря-площина» ($l_{\min} = 1,5$ м) в межах 11 %. Відзначимо, що при $T_{dc} \approx 17$ мкс максимальна довжина l_{cm} реального шляху плазмового каналу газового розряду в досліджуваній ДЕРС буде приблизно рівною $l_{cm} \approx v_L T_{dc} \approx 1,7$ м. Отримане вище розрахункове чисельне значення $l_c \approx 1,53$ м відрізняється від цього дослідного значення l_{cm} не більше ніж на 11 %. Ці розрахунково-експериментальні дані також вказують на достовірність прийнятих в роботі основних початкових фізичних положень і отриманих на їх основі розрахункових результатів, що відносяться до фізики розвитку в гомогенному газовому діелектрику досліджуваної ДЕРС електророзрядних процесів і кількісного вибору за формулами (6) і (7) сумарної довжини l_c реального шляху розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі цієї ДЕРС.

Важливо зазначити те, що мінімальне значення падіння напруги U_c на довжині l_c реального шляху розвитку в повітрі плазмового каналу імпульсного іскрового розряду буде обумовлювати за (6) і мінімальне значення l_c . При постійності усередненої швидкості v_L розповсюдження в атмосферному повітрі переднього фронту лідера в плазмовому каналі газового розряду ($v_L \approx 10^5$ м/с [8]) мінімізація довжини l_c приводить до мінімізації часу t_d просування як плазмового лідерного, так і іскрового каналу імпульсного розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС ($l_{\min} = 1,5$ м).

Висновки.

1. Запропонований узагальнений фізичний принцип розвитку плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в гомогенному діелектрику різного агрегатного стану, матично записаний для сумарної довжини $l_c = \int_A^B dl_{cn}$

реального шляху розвитку цього виду електричного розряду за прямолінійними елементарними ділянками плазмового каналу довжиною dl_{cn} різної просторової орієнтації в газовому діелектрику прийнятої двоелектродної розрядної системи (ДЕРС) з найменшою довжиною l_{\min} її розрядного проміжку. Даний принцип (фізичний закон) указує на те, що в ДЕРС плазмовий канал високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в газовому, рідкому і твердому діелектриках розповсюджується від його початкової точки A на потенційному електроді ДЕРС до точки завершення B на заземленому електроді ДЕРС за шляхом, що забезпечує найменше падіння на ньому електричної напруги $U_c = \int_A^B dU_{cn}$, де dU_{cn} – падіння електричної напруги на прямолінійній елементарній ділянці плазмового каналу розряду завдовжки $dl_{cn} \ll l_{\min}$.

2. Показано, що запропонований фізичний принцип розвитку плазмового каналу електричного імпульсного іскрового розряду в досліджуваному газово-діелектрику ДЕРС за математичною формою і призначенню є близьким до фундаментального фізичного принципу Ферма, який є загальним законом геометричної оптики і який визначає мінімальну оптичну

довжину $L_0 = \int_A^B n_0 ds$ при розповсюдженні реального світлового променя в оптично прозорому середовищі з показником заломлення світла n_0 між точками початку A і завершення B його розповсюдження в цьому середовищі, де ds – довжина елементарної ділянки розповсюдження світлового променя в оптично прозорому середовищі.

3. Розрахунковим шляхом встановлено, що падіння електричної напруги U_c на сумарній довжині l_c реального зигзагоподібного шляху розвитку в повітряному діелектрику досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» ($l_{\min}=1,5$ м) плазмового каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду для стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності задовольняє нерівності вигляду $U_c \ll (\varphi_{1d} - \varphi_2)$ і при $\varphi_{1d} \approx 611,6$ кВ ($\varphi_2=0$) чисельно складає $U_c \approx 54,6$ кВ, що не перевищує 9 % від дослідного рівня пробивної електричної напруги $U_{12d}(t) \approx (\varphi_{1d} - \varphi_2) \approx 611,6$ кВ в даній ДЕРС з атмосферним повітрям. При цьому вказаний розрахунковий рівень падіння електричної напруги $U_c \approx 54,6$ кВ на даному плазмовому каналі іскрового розряду практично відповідає раніше отриманому автором дослідному чисельному рівню падіння електричної напруги $U_c \approx 53,6$ кВ на ній в аналогічній повітряній ДЕРС.

4. Виконані високовольтні сильнотрумові експерименти на потужному електрофізичному устаткуванні НДПКИ «Молнія» НТУ «ХП» для досліджуваної повітряної ДЕРС «вістря-площина» ($l_{\min}=1,5$ м; $\varphi_2=0$), яка випробовує дію стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності, підтверджують достовірність основних фізичних положень, покладених в основу розробленого узагальненого принципу розвитку плазмового каналу імпульсного іскрового розряду в діелектрику (на прикладі атмосферного повітря в ДЕРС), і отриманих для нього деяких розрахункових результатів (зокрема, для чисельних значень падіння електричної напруги U_c на сумарній довжині l_c реального шляху розвитку в атмосферному повітрі плазмового каналу імпульсного іскрового розряду і усередненої пробивної для атмосферного повітря напруженості E_d сильного електричного поля $E_d \approx \varphi_{1d}/l_c \approx 400$ кВ/м в умовах дії на повітряну ДЕРС вказаного мікросекундного імпульсу напруги, а також для кількісних даних сумарної довжини l_c реального шляху розвитку плазмового каналу розряду $l_c \approx 1,53$ м, які підтверджують виконання нерівності вигляду $l_c > l_{\min}$, яке визначає зигзагоподібну форму розвитку в атмосферному повітрі як плазмового лідерного каналу розряду, так і далі подібну форму розвитку високовольтного електричного імпульсного іскрового каналу розряду в цьому діелектрику).

5. Показано, що розрахунковий час t_d просування плазмового лідерного каналу електричного імпульсного іскрового розряду в досліджуваній повітряній ДЕРС ($l_{\min}=1,5$ м) за його реальним шляхом в атмосферному повітрі сумарною довжиною $l_c \approx 1,53$ м при усередненій швидкості розповсюдження в цьому повітрі переднього фронту лідера в плазмовому каналі розряду $v_L \approx 10^5$ м/с чисельно складає біля $t_d \approx l_c/v_L \approx 15,3$ мкс. Даний розрахунковий результат для часу t_d відрізняється не більше ніж на 11 % від дослідної тривалості зрізу $T_d \approx t_d \approx 17$ мкс, яка характеризує час закорочування електропровідним плазмовим лідерним каналом розряду повітряного проміжку завдовжки l_c в ДЕРС, для стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми $T_m/T_d \approx 200$ мкс/1990 мкс позитивної полярності ($\varphi_{1d} \approx 611,6$ кВ) в досліджуваній ДЕРС з мінімальною довжиною її розрядного повітряного проміжку, рівною $l_{\min}=1,5$ м.

Фінансування. Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (тема ДБ № 0123U101704).

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дашук П.Н., Зайєнц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкурпат П.И., Шнейерсон Г.А. *Техника больших импульсных токов и магнитных полей*. М.: Атомиздат, 1970. 472 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 391 с.
3. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
4. Месяц Г.А. *Генерирование мощных наносекундных импульсов*. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
5. Бржезицький В.О., Білий І.В., Бойко М.І., Гуль В.І., Гурин А.Г., Льєнко О.С., Ісакова А.В., Кондра Б.М., Копшин В.О., Кравченко В.І., Набока Б.Г., Проценко О.Р., Рудаков В.В., Хименко Л.Т., Хомініч В.І., Шостак В.О., Янішевський В.І. *Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник* / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. 930 с.
6. Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. *Теория искры*. М.: Атомиздат, 1975. 272 с.
7. Ушаков В.Я. *Импульсный электрический пробой жидкостей*. Томск: Изд-во ТГУ, 1975. 255 с.
8. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 592 с.
9. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*, 2010, № 5, С. 69-74.
10. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V. A calculation of basic thermophysical, gasodynamic and electropower parameters of electric explosion in the gas environment of metallic exploder. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 1, pp. 40-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.06>.
11. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Tour A.N. High-Voltage Spark Gaps for Technological Purposes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2001, vol. 44, no. 2, pp. 204-212. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1017515003483>.
12. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Мультифизическое моделирование в электротехнике*. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2015. 305 с.
13. Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J. Fractal Dimension of Dielectric Breakdown. *Physical Review Letters*, 1984, vol. 52, no. 12, pp. 1033-1036. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.1033>.

14. Wiesmann H.J., Zeller H.R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. *Journal of Applied Physics*, 1986, vol. 60, no. 5, pp. 1770-1773. doi: <https://doi.org/10.1063/1.337219>.
15. Kebbabi L., Beroual A. Fractal analysis of creeping discharge patterns propagating at solid/liquid interfaces: influence of the nature and geometry of solid insulators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 1, pp. 177-183. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/1/026>.
16. Hu H.M., Yang Y., Lu W., Zhao G.P. Electrical Tree Simulation Based on the Self-Organization Criticality. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1273-1276. doi: <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B241>.
17. Pashchenko A.V., Maslov V.I., Naugolnij I.N. Fractal phenomenological theory of impulse breakdown of liquid and solid dielectrics. *Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, 1995, vol. 2, pp. 863-868. doi: <https://doi.org/10.1109/PPC.1995.599720>.
18. Gladkov V.S., Maslov V.I., Naugolnij I.N., Pashchenko A.V. To the Problem of the Physical Model of the Fractal Discharge in Liquid and solid Dielectric. *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 2002, vol. 1, no. 7, pp. 81-85.
19. Кухлинг Х. *Справочник по физике* / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1982. 520 с.
20. ГОСТ 1516.2-97. *Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции*. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. 31 с.
21. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 653-658. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441213050126>.
22. Кузьмичев В.Е. *Законы и формулы физики* / Отв. ред. В.К. Тартаковский. К.: Наукова думка, 1989. 864 с.
23. Баранов М.И., Колюшко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальное определение активного сопротивления и электропроводности сильноточного плазменного канала в разрядной цепи генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии. *Электротехника і електромеханіка*, 2011, № 3, С. 51-55.
24. Баранов М.И. *Избранные вопросы электрофизики. Монография в 4-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач*. Х.: Точка, 2014. 400 с.
25. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering 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 electromagnetic compatibility. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 37-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.
- Khymenko L.T., Khominich V.I., Shostak V.O., Yanishevsky V.I. *Technique and Electrophysics of High Voltages*. Kharkiv, NTU «KhPI», Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
6. Lozanskyi E.D., Firsov O.B. *Theory of spark*. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 272 p. (Rus).
7. Ushakov V.Ja. *Pulse electrical breakdown of liquids*. Tomsk, TSU Publ., 1975. 255 p. (Rus).
8. Rayzer Yu.P. *Physics of gas discharge*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
9. Vovchenko A.I., Bohuslavsky L.Z., Myroshnychenko L.N. Trends in development of high-powered high-voltage pulse current generators in the Institute of Pulse Processes and Technology of Ukraine (review). *Technical electrodynamics*, 2010, no. 5, pp. 69-74. (Rus).
10. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V. A calculation of basic thermophysical, gasodynamic and electropower parameters of electric explosion in the gas environment of metallic exploder. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 1, pp. 40-50. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.1.06>.
11. Boyko N.I., Evdoshenko L.S., Zarochentsev A.I., Ivanov V.M., Tour A.N. High-Voltage Spark Gaps for Technological Purposes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2001, vol. 44, no. 2, pp. 204-212. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1017515003483>.
12. Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. *Multiphysics Modeling in Electrical Engineering*. Kyiv, Institute of Electrodynamics of the NASU of Ukraine, 2015. 305 p. (Rus).
13. Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J. Fractal Dimension of Dielectric Breakdown. *Physical Review Letters*, 1984, vol. 52, no. 12, pp. 1033-1036. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.1033>.
14. Wiesmann H.J., Zeller H.R. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics. *Journal of Applied Physics*, 1986, vol. 60, no. 5, pp. 1770-1773. doi: <https://doi.org/10.1063/1.337219>.
15. Kebbabi L., Beroual A. Fractal analysis of creeping discharge patterns propagating at solid/liquid interfaces: influence of the nature and geometry of solid insulators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, vol. 39, no. 1, pp. 177-183. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/1/026>.
16. Hu H.M., Yang Y., Lu W., Zhao G.P. Electrical Tree Simulation Based on the Self-Organization Criticality. *Energy and Power Engineering*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 1273-1276. doi: <https://doi.org/10.4236/epe.2013.54B241>.
17. Pashchenko A.V., Maslov V.I., Naugolnij I.N. Fractal phenomenological theory of impulse breakdown of liquid and solid dielectrics. *Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, 1995, vol. 2, pp. 863-868. doi: <https://doi.org/10.1109/PPC.1995.599720>.
18. Gladkov V.S., Maslov V.I., Naugolnij I.N., Pashchenko A.V. To the Problem of the Physical Model of the Fractal Discharge in Liquid and solid Dielectric. *Bulletin of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 2002, vol. 1, no. 7, pp. 81-85.
19. Kuhlning H. *Handbook of Physics*. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
20. *Standard GOST 1516.2-97. Electrical equipment and installations for a.c. voltages 3 kV and higher. General methods of dielectric tests*. Minsk, Intergovernmental Council of Standardization, Measuring and Certification Publ., 1997. 31 p. (Rus).
21. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. A switching aperiodic superhigh-voltage pulse generator for testing the electric strength of insulation of technical objects. *Instruments and Experimental Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 653-658. doi: <https://doi.org/10.1134/S0020441213050126>.
22. Kuz'michev V.E. *Laws and formulas of physics*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
23. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. Experimental determination of active resistance and conductivity of heavy-current plasma channel in the discharge chain of generator im-

REFERENCES

1. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolayevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *The technique of large pulsed currents and magnetic fields*. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. Knopfel' G. *Ultra strong pulsed magnetic fields*. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
3. Gulyy G.A. *Scientific basis of the discharge-pulse technologies*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
4. Mesiats G.A. *Generation of power nanosecond pulses*. Moscow, Soviet Radio Publ., 1974. 256 p. (Rus).
5. Brzhezitsky V.O., Bilyi I.V., Boiko M.I., Gul' V.I., Gurin A.G., Il'enko O.S., Isakova A.V., Kondra B.M., Kopshin V.O., Kravchenko V.I., Naboka B.G., Protsenko O.R., Rudakov V.V.,

pulsive components of current of artificial lightning. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 3, pp. 51-55. (Rus).
24. Baranov M.I. *Selected topics of Electrophysics. Monograph in 4 Vols. Vol. 3. Theory and practice of electrophysics tasks.* Kharkiv, Tochka Publ., 2014. 400 p. (Rus).
25. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Kniaziev V.V., Rudenko S.S. Analysis of characteristics and possibilities of high-voltage electrical engineering 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 electromagnetic compatibility. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 4, pp. 37-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.4.06>.

Надійшла (Received) 17.08.2023

Прийнята (Accepted) 12.10.2023

Опублікована (Published) 02.01.2024

Баранов Михайло Іванович, д.т.н., гол.н.с.,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут
«Молнія» Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»,
61013, Харків, вул. Шевченка, 47,
e-mail: baranovmi49@gmail.com (Corresponding Author);

M.I. Baranov
Research and Design Institute «Molniya»
of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric.

Goal. Development of the generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage electrical pulse spark discharge in the homogeneous dielectric of the different aggregate state. **Methodology.** Basis of physical optics, theoretical electrical engineering, electrophysics bases of technique of high-voltage and large pulse currents, bases of high-voltage pulse technique and measuring technique. **Results.** Development of physical principle of development of plasma channel of an electric pulse spark discharge is executed in a homogeneous gas dielectric on the applied example of the use in calculations and experiments of the double-electrode discharge system (DEDS) with a long air interval, testing action of standard interconnect aperiodic pulse of high-voltage of temporal shape

of $T_m/T_d \approx 200 \mu\text{s}/1990 \mu\text{s}$ of positive polarity. The generalized formula is got for the calculation of total length of l_c of the real way of development of an pulse spark discharge in an air dielectric, which allowed to formulate the offered physical principle in the following kind: «The plasma channel of an pulse spark discharge in a gas dielectric spreads from one of its points to other after a way length of l_c , providing the least falling on it of electric voltage of U_c ». It is shown that this principle in the first approaching can be applied and to the homogeneous liquid and hard dielectrics. Comparison of the developed physical principle of distribution of plasma channel of an electrical spark discharge is executed in a dielectrical environment with fundamental Fermat physical principle (a law) for distribution of light in an optically transparent environment, which specifies on mathematical likeness and closeness on destiny of these physical principles. Calculation estimations of falling of electric voltage of U_c on total length of l_c of the real zigzag way of development in the air dielectric of DEDS a «edge-plane» with the least length of its discharge interval of $l_{\min}=1,5 \text{ m}$ is presented, that a value U_c does not exceed 9 % from the experimental level of aggressive voltage of $U_{md} \approx 611,6 \text{ kV}$ in this DEDS for the aperiodic pulse of voltage of $T_m/T_d \approx 200 \mu\text{s}/1990 \mu\text{s}$. It is set that the estimated time of t_d advancement of leader channel of electric pulse discharge in air DEDS ($l_{\min}=1,5 \text{ m}$) on its real way total length of $l_c \approx 1,53 \text{ m}$ makes $t_d \approx 15,3 \mu\text{s}$, and experimental duration of cut of T_{dc} of the indicated aperiodic impulse of voltage utilized in experiments, characterizing time of short circuit by the plasma channel of discharge of air interval in DEDS, appears equal $T_{dc} \approx t_d \approx 17 \mu\text{s}$. **Originality.** The generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage electrical pulse spark discharge is first developed in the homogeneous dielectric of the different aggregate state. **Practical value.** Application in electrical engineering practice and high-voltage pulse technique of the offered principle of distribution in the dielectrics of plasma channel of an pulse spark discharge will allow to develop both new and to perfect the existent methods of computer design of electro-discharge processes in the gas, liquid and hard insulation of different high-voltage electrical power engineering and electrophysics devices, directed on the increase of reliability of their operation. References 25, figures 5.

Key words: plasma channel, spark discharge, dielectric environment, physical principle of development of plasma channel, calculation, experiment.

How to cite this article:

Baranov M.I. A generalized physical principle of development of plasma channel of a high-voltage pulse spark discharge in a dielectric. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 1, pp. 34-42. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.1.05>