

М.І. Баранов

## Розрахунково-експериментальне визначення швидкості просування плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі

Надані результати розрахунково-експериментального визначення усередненої швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу електричного імпульсного іскрового розряду в довгому повітряному проміжку двоелектродної розрядної системи «вістря-площина» (для двох прикладних випадків при  $l_{\min}=1,5$  м і  $l_{\min}=3$  м), яка випробовує дію стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої і надвисокої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності. Запропонований метод чисельної оцінки величини  $v_L$  в даній розрядній системі базується на використанні отриманої емпіричної формули та отриманні осцилограм процесу зрізу застосованих імпульсів над- і високої напруги при електричному пробі в ній довгих повітряних проміжків вказаної мінімальної довжини  $l_{\min}$ . На основі запропонованої наближеної розрахункової формули і виконаних за допомогою потужного надвисоковольтного випробувального обладнання сильноточових експериментів показано, що вказана швидкість  $v_L$  розповсюдження в атмосферному повітрі переднього фронту позитивного лідера імпульсного іскрового розряду чисельно складає  $v_L \approx (1 \pm 0,03) \cdot 10^5$  м/с. Отримані розрахунково-експериментальні дані для усередненої швидкості  $v_L$  просування в повітрі лідерного каналу імпульсного іскрового розряду добре узгоджуються з її прийнятими для грозових іскрових розрядів в атмосферному повітрі чисельними показниками. Бібл. 20, рис. 5.

**Ключові слова:** плазмовий лідерний канал, електричний імпульсний іскровий розряд, повітряний діелектрик, швидкість просування фронту іскрового розряду, розрахунок, експеримент.

**Стан та актуальність задачі.** У техніці високих (надвисоких) електричних напруг реальну небезпеку для використовуваного електроустаткування представляє електричний пробій його вакуумної, газової, рідкої або твердої ізоляції, який супроводжується виникненням явища короткого замикання в електричному колі, утворенням в місці пробією високопровідного іскрового (дугового) каналу розряду і протіканням через нього великого імпульсного струму. Повітряна ізоляція достатньо широке практичне застосування як в промисловій електроенергетиці, так і в області високовольтної імпульсної техніки (ВІТ), призначеної для наукових і технологічних цілей [1-6].

Відомо, що в довгих повітряних проміжках (при довжинах 1 м і більш) їх електричний пробій здійснюється шляхом проростання від одного електроду (наприклад, від потенційного анода) високовольтного пристрою до іншого (наприклад, до заземленого катода) лідера електричного газового розряду – тонкого плазмового провідного каналу, ступінь іонізації молекул (атомів) газу в якому є значно вищим, ніж в початковому стримерному каналі розряду [3, 7]. Після досягнення голівкою лідера електричного розряду, яка яскраво світиться, протилежного електроду-катода і розповсюдження по лідерному каналу у бік анода із швидкістю біля  $v_L \approx 10^7$  м/с спочатку зворотної хвилі сильного електричного поля (хвилі електричного потенціалу) і далі зворотної хвилі струму провідності на місці лідерного каналу формується сильноіонізований іскровий канал розряду, який яскраво світиться [3, 7]. Із-за протікання по цьому високопровідному каналу великого імпульсного струму та інтенсивного енерговиділення на його омичному опорі температура і тиск в нім різко зростають, що приводить до розширення каналу іскрового розряду із швидким радіальним розльотом його низькотемпературної плазми і утворенням в навколишньому повітряному середовищі потужної ударної хвилі. Не дивлячись на наявність багато разів апробованих в наукових лабораторіях світу відомих теорій стримерного і лідерного пробією повітряної ізоляції [1, 3, 7], маловивченими питаннями на сьогодні в області фізики імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі залишилися ті, які пов'язані з урахуванням особливостей його протікан-

ня в умовах дії різко неоднорідних сильних імпульсних електричних полів, характерних для електротехнічної практики, і визначенням швидкості  $v_L$  просування його плазмового лідерного каналу, який першим при пробіє закорочує повітряні проміжки електророзрядних систем, що входять до складу різноманітних високовольтних пристроїв.

Результати математичного і комп'ютерного моделювання складних електророзрядних процесів в різних видах діелектриків [1, 3, 8-14], які спрямовані на підвищення електричної міцності газової, рідкої і твердої ізоляції використовуваного в електроенергетиці і ВІТ високовольтного електроустаткування, не дозволяють дати відповіді на вказані вище актуальні питання з області електрофізики газового іскрового розряду. Поглиблення наших наукових знань про електричний імпульсний іскровий розряд в газовій ізоляції (зокрема в довгих повітряних проміжках), що відноситься до комплексного і складного електрофізичного явища природи, дозволяє раціональніше розробляти конструкції багатьох високовольтних електротехнічних і електроенергетичних пристроїв з підвищеною надійністю їх роботи в нормальних і аварійних режимах, а також засоби блискавкозахисту як для різних літальних апаратів, так і стратегічних промислово-технічних об'єктів наземної інфраструктури.

**Метою статті** є розрахунково-експериментальне визначення усередненої швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу електричного імпульсного іскрового розряду в довгому повітряному проміжку двоелектродної розрядної системи «вістря-площина».

**1. Постановка задачі.** Типовим прикладом в області ВІТ електророзрядної системи з різко неоднорідним сильним імпульсним електричним полем є двоелектродна розрядна система (ДЕРС) «вістря-площина», що містить вертикально розміщений потенційний електрод у вигляді металевого стрижня 1 радіусом  $r_0$  із загостренням нижнім краєм з радіусом його кривизни  $r_c \ll r_0$  і заземлений електрод у вигляді горизонтально розташованої металевої площини 2 обмежених розмірів (рис. 1). Хай електричні потенціали цих електродів 1 і 2 рівні відповідно  $\varphi_1$  і  $\varphi_2=0$ , а між ними в міжелектродному ізоляційному проміжку міні-

© М.І. Баранов

мальною довжиною  $l_{\min}$ , рівній довжині прямої, проведеної від вістря потенційного електроду 1 за нормаллю до плоскої поверхні заземленого електроду 2, розміщеного гомогенне атмосферне повітря за таких фізичних умов [15]: тиск газу  $P_a \approx (1,013 \pm 0,005) \cdot 10^5$  Па; абсолютна температура газу  $T_a \approx (293,15 \pm 5)$  К; відносна вологість газу  $\gamma_a \approx (45 \pm 15)$  %.

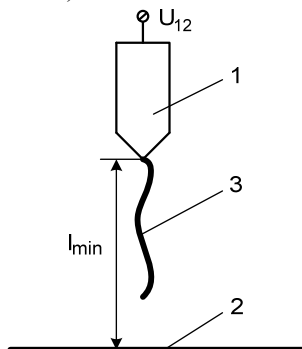


Рис. 1. Схематичне зображення досліджуваної повітряної ДЕРС, на прикладі якої розглядається електрофізичний процес розповсюдження плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі (1, 2 – відповідно потенційний і заземлений металеві електроди; 3 – зигзагоподібний лідерний канал іскрового розряду в ДЕРС)

Прийемо, що електрична міцність міжелектродного повітряного проміжку в ДЕРС стосовно усередненого рівня його пробивної напруженості  $E_d$  сильного імпульсного електричного поля для імпульсу над- і високої напруги, що подається на ДЕРС, складає величину  $E_{d1}$  для  $l_{\min}=1,5$  м і  $E_{d2}$  для  $l_{\min}=3$  м. У цих двох прикладних випадках електричний потенціал  $\phi_1$  на краю стрижня з вістрям ДЕРС набуватиме критичних значень, відповідно рівних  $\phi_{1d1}$  і  $\phi_{1d2}$ . Обмежимося розглядом випадку, коли амплітудно-часові параметри (АЧП) електричної імпульсної напруги  $U_{12}(t) = (\phi_1 - \phi_2)$  у міжелектродному повітряному проміжку ДЕРС змінюються в часі  $t$  за законом стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми  $T_m/T_d \approx (250 \pm 50)$  мкс/( $2500 \pm 750$ ) мкс позитивної полярності з відповідними допусками [16-18]. Вкажемо, що саме ця часова форма високої (надвисокої) імпульсної напруги зазвичай використовується в промисловій електроенергетиці і ВІТ при визначенні електричної міцності внутрішньої і зовнішньої ізоляції різного високовольтного електроустаткування. Потрібно на основі розрахункових і експериментальних даних, які стосуються протікання електрофізичних процесів в розрядному довгому повітряному проміжку ДЕРС (див. рис. 1), в наближеному вигляді чисельно визначити усереднену швидкість  $v_L$  просування позитивного лідера в плазмовому каналі електричного імпульсного іскрового розряду в повітряному проміжку досліджуваної нами ДЕРС «вістря-площина» з вказаними двома чисельними значеннями його мінімальної довжини ( $l_{\min}=1,5$  м і  $l_{\min}=3$  м).

**2. Розрахунково-експериментальна оцінка швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі.** Дослідні результати досліджень в області ВІТ електричного пробую довгих повітряних проміжків в ДЕРС «вістря-площина» з використанням стандартного комутаційного імпульсу напруги часо-

вої форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності свідчать про те, що розвиток в них плазмового лідерного каналу високовольтного імпульсного іскрового розряду відбувається по шляху зигзагоподібної форми, довжина якого  $l_c$  завжди перевищує їх мінімальну довжину  $l_{\min}$  з обов'язковим виконанням нерівності вигляду  $l_c \geq 1,1 l_{\min}$  [1, 3, 17-19]. При зміні у вказаній повітряній ДЕРС мінімальної довжини  $l_{\min}$  їх розрядних проміжків в діапазоні  $l_{\min} \approx (1-4)$  м дана відмінність між довжинами  $l_c$  і  $l_{\min}$  складає від 10 до 15 % [17-19]. Для визначеності подальших розрахункових оцінок усередненого значення шуканого параметра  $v_L$  зупинимося на тому прикладному випадку, коли ця відмінність між довжинами  $l_c$  і  $l_{\min}$  в середньому виявляється рівною приблизно 13 %, а відношення  $l_c/l_{\min}$  чисельно складає біля  $l_c/l_{\min} \approx 1,13$ . Враховуючи цей дослідний результат, формула для наближеної розрахункової оцінки усередненої швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу високовольтного електричного імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі прийнятої ДЕРС «вістря-площина» при  $l_{\min} \approx (1-4)$  м приймає наступний емпіричний вигляд:

$$v_L \approx 1,13 l_{\min} / T_{dc}, \quad (1)$$

де  $T_{dc}$  – тривалість зрізу імпульсу напруги, який викликає електричний пробій довгого повітряного проміжку в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина», мінімальна довжина якого чисельно складає  $l_{\min} \geq 1$  м.

У (1) чисельне значення параметра  $l_{\min} \geq 1$  м для повітряної ДЕРС «вістря-площина» вибирається персоналом випробувальної бригади і фіксується відповідним вимірювальним інструментом (довгою метричною лінійкою) експериментальним шляхом, а чисельне значення тривалості зрізу  $T_{dc}$  імпульсу напруги визначається шляхом розшифрування його осцилограм у процесі електричного пробую повітряного проміжку в ДЕРС довжиною  $l_{\min}$  з використанням цифрового запам'ятовуючого осцилографа і надвисоковольтного омичного подільника напруги (ОПН). Застосування у випадку, що розглядається нами, вказаного типу подільника надвисокої напруги пов'язано з відносною простотою його виготовлення і порівняно невеликою вартістю комплектуючих електричних елементів, що входять до його складу [18, 20].

Використання в (1) саме величини  $T_{dc}$  пояснюється тим фізичним положенням, що ця тривалість зрізу  $T_{dc}$  імпульсу високої (надвисокої) імпульсної напруги, що подається на повітряну ДЕРС, характеризує час закорочування по повітряному шляху реальною довжиною  $l_c$  провідним плазмовим лідерним каналом електричного імпульсного іскрового розряду вибраного нами повітряного проміжку в даній ДЕРС з його мінімальною довжиною  $l_{\min}$  і відповідно час вирівнювання електричних потенціалів ( $\phi_1 \approx \phi_2 \approx 0$ ) на електродах досліджуваної нами ДЕРС.

На рис. 2 приведений загальний вигляд досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» з довгим розрядним повітряним проміжком довжиною  $l_{\min}=3$  м, яка була гальванічно підключена до сильноточового розрядного електричного кола надвисоковольтного генератора стандартних комутаційних аперіодичних імпульсів напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної (негативної) полярності, розробленого і створеного в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ» [17, 18].



Рис. 2. Загальний вигляд надвисоковольтної повітряної ДЕРС «вістря-площина» ( $l_{\min}=3$  м), в якій до потенційного верхнього загостреного на нижньому краю сталевого електроду-стрижню радіусом  $r_0 \approx 15$  мм, розміщеному по центру її заземленого нижнього плоского електроду з оцинкованої сталі з габаритними розмірами  $5 \times 5$  м, приєднаний ОПН-2,5 на номінальну електричну імпульсну напругу 2,5 МВ з коефіцієнтом ділення  $K_d \approx 53650$  [18]

На рис. 3 наведена дослідна осцилограма повного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності, який діє в розрядному колі вказаного надвисоковольтного випробувального генератора [17, 18] на досліджувану нами повітряну ДЕРС «вістря-площина» без електричного пробую її довгого повітряного проміжку завдовжки  $l_{\min}=3$  м.

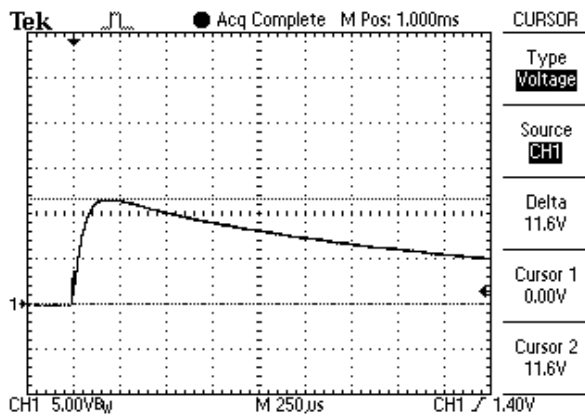


Рис. 3. Осцилограма повного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності без електричного пробую довгого повітряного проміжку завдовжки  $l_{\min}=3$  м в ДЕРС «вістря-площина» ( $U_{mc} \approx 11,6$  В  $\times$  53650  $\approx$  622,3 кВ – амплітуда імпульсу високої напруги;  $T_m \approx 200$  мкс – час наростання (підйому) імпульсу напруги до амплітуди  $U_{mc}$ ;  $T_d \approx 1990$  мкс – тривалість імпульсу напруги на рівні  $0,5U_{mc}$ ; масштаб за вертикаллю – 268,2 кВ/діл; масштаб за горизонталлю – 250 мкс/діл)

На рис. 4 зображена дослідна осцилограма зрізаного на наростаючій частині використовуваного в експериментах стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс з електричним пробую довгого повітряного розрядного проміжку в ДЕРС «вістря-площина» мінімальною довжиною  $l_{\min}=1,5$  м, АЧП якого визначалися згідно вимог діючого стандарту [16].

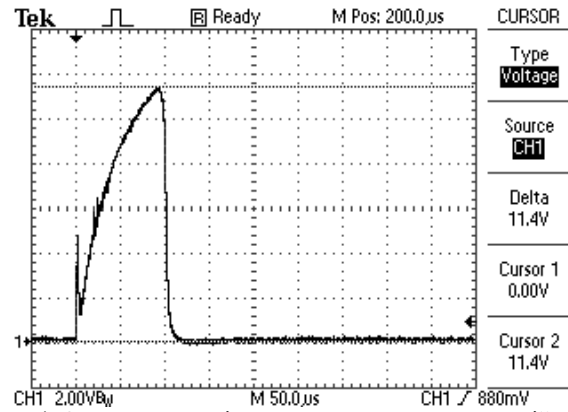


Рис. 4. Осцилограма зрізаного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності при електричному пробую довгого повітряного проміжку завдовжки  $l_{\min}=1,5$  м в ДЕРС «вістря-площина» ( $U_{mc} \approx 11,4$  В  $\times$  53650  $\approx$  611,6 кВ – рівень зрізу імпульсу напруги;  $T_c \approx 95$  мкс – час зрізу імпульсу напруги;  $T_d \approx 17$  мкс – тривалість зрізу (комутації) імпульсу напруги; масштаб за вертикаллю – 107,3 кВ/діл; масштаб за горизонталлю – 50 мкс/діл)

Використовуючи отримані згідно рис. 4 дослідні чисельні дані для тривалості зрізу  $T_d \approx 17$  мкс відповідного імпульсу високої напруги (для випадку, коли  $U_{mc} \approx 611,6$  кВ) в повітряній ДЕРС ( $l_{\min}=1,5$  м), що розглядається, з (1) для усередненої швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі її вказаного довгого розрядного проміжку витікає, що  $v_L \approx 0,997 \cdot 10^5$  м/с. При даній швидкості  $v_L$  розповсюдження в атмосферному повітрі позитивного лідера імпульсного іскрового розряду прохідний їм реальний шлях довжиною  $l_c$  в міжелектродному повітряному проміжку ДЕРС ( $l_{\min}=1,5$  м) при його електричному пробую ( $T_d \approx 17$  мкс) застосованим імпульсом високої напруги чисельно складає  $l_c \approx v_L T_d \approx 1,695$  м. Бачимо, що в цьому випадку реальна довжина  $l_c$  шляху розвитку лідерного каналу іскрового розряду в досліджуваній ДЕРС перевищує мінімальну довжину  $l_{\min}=1,5$  м її розрядного повітряного проміжку приблизно на 13 %.

Відмітимо, що при швидкості збільшення імпульсної напруги  $U_{12}(t)$ , яка прикладається до розрядного проміжку повітряної ДЕРС, рівній  $dU_{12}(t)/dt \geq 5$  кВ/мкс (як в наших електрофізичних випадках) розвиток позитивного лідера в атмосферному повітрі відбувається безперервно (без ступінчастого утворення в ДЕРС окремих плазмових лідерних каналів) [3]. При такому процесі просування в повітрі позитивного лідера розряду довжина  $l_c$  його плазмового каналу в цій ДЕРС монотонно збільшуватиметься (див. рис. 1).

Для порівняння отриманого вище чисельного результату для середньої швидкості  $v_L$  позитивного лідера, характерного для електророзрядних процесів, які протікають в лабораторних умовах в повітряній ДЕРС «вістря-площина» з її довгим розрядним проміжком ( $l_{\min}=1,5$  м), з відомими відзначимо, що згідно [7] найменша середня швидкість  $v_L$  просування в атмосферному повітрі переднього фронту негативного лідера довгого іскрового розряду між грозовою хмарою і поверхнею землі (блискавки) кількісно складає біля  $v_L \approx 10^5$  м/с. Як бачимо, отриманий в лабораторних умо-

вах з використанням цієї ДЕРС при  $l_{\min}=1,5$  м і стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу надвисокої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності наблизений з урахуванням (1) розрахунково-експериментальний результат для усередненої швидкості  $v_L \approx 0,997 \cdot 10^5$  м/с просування в атмосферному повітрі плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду практично дорівнює її прийнятим в області фізики атмосферної електрики (блискавки) і електрофізики надвисоких напруг кількісним значенням ( $v_L \approx 10^5$  м/с [7]).

Зазначимо, що при виконанні над- і високовольтних експериментів з використанням досліджуваної повітряної ДЕРС «вістря-площина» (див. рис. 2) і отриманим нами при цьому для довгих розрядних повітряних проміжків ( $l_{\min}=1,5$  м і  $l_{\min}=3$  м) дослідним результатам згідно рис. 4 і рис. 5 були застосовані як омичний подільник напруги типу ОПН-2,5 ( $K_d \approx 53650$ ) [18], так і повірений державною метрологічною службою цифровий осцилограф Tektronix TDS 1012B, що запам'ятовує корисні електричні сигнали (сертифікат калібрування UA01№1312 від 29.06.2023 р.).

На рис. 5 зображена осцилограма зрізаного на фронтальній частині використовуваного в лабораторних сильноточових експериментах, що виконувалися нами, надвисоковольтного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс з електричним пробоем довгого повітряного розрядного проміжку в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина» мінімальною довжиною  $l_{\min}=3$  м.

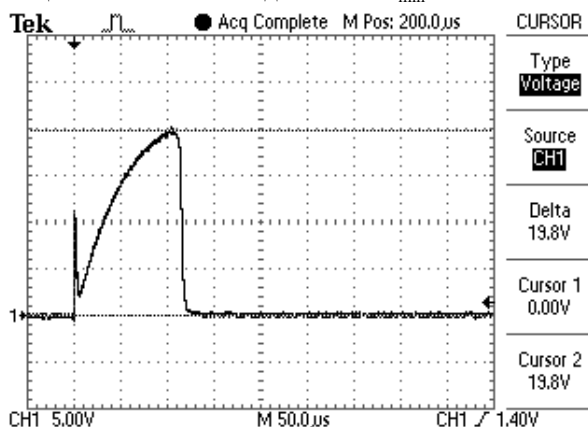


Рис. 5. Осцилограма зрізаного стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу надвисокої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності при електричному пробое довгого повітряного проміжку завдовжки  $l_{\min}=3$  м в ДЕРС «вістря-площина» ( $U_{mcd} \approx 19,8 \text{ В} \times 53650 \approx 1062,3$  кВ – рівень зрізу імпульсу напруги;  $T_c \approx 104$  мкс – час зрізу імпульсу напруги;  $T_{dc} \approx 33$  мкс – тривалість зрізу (комутації) імпульсу напруги; масштаб за вертикаллю – 268,2 кВ/діл; масштаб за горизонталлю – 50 мкс/діл)

Вкажемо, що наявність пікоподібних сплесків на приведених згідно рис. 4 і рис. 5 осцилограмах зрізаних імпульсів напруги (спочатку їх фронтальних частин) пов'язано з конструкційними особливостями побудови використовуваного в схемі формування застосованих нами аперіодичних імпульсів напруги надвисоковольтного генератора типу ГІН-4 [17, 18], що має розміщений на висоті  $\sim 12$  м над землею масивний сталевий екран-дах площею біля  $60 \text{ м}^2$ . Швидкий заряд і розряд електричної ємності цього екрану-даху

ГІН-4 і викликає появу вказаних піків напруги. Ці пікоподібні сплески напруги не можуть вплинути на розвиток електророзрядних процесів у нашій ДЕРС.

Згідно дослідним даним (рис. 5) у разі електричного пробоя довгого повітряного проміжку в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина» ( $l_{\min}=3$  м) тривалість зрізу  $T_{dc}$  на фронті надвисоковольтного ( $U_{mcd} \approx 1062,3$  кВ) стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності приймає чисельне значення, рівне приблизно  $T_{dc} \approx 33$  мкс. Бачимо, що із збільшенням удвічі (з 1,5 м до 3 м) мінімальної довжини  $l_{\min}$  повітряного розрядного проміжку в ДЕРС «вістря-площина» практично удвічі зростає і тривалість зрізу  $T_{dc}$  на наростаючій частині використовуваного випробувального імпульсу напруги  $U_{12}(t)$  (приблизно з 17 мкс до 33 мкс згідно даним дослідних осцилограм на рис. 4 і рис. 5). Дані експериментальні результати вказують на те, що усереднена швидкість  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу імпульсного іскрового розряду в атмосферному повітрі досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» з різко неоднорідним сильним імпульсним електричним полем при зміні в ній мінімальної довжини  $l_{\min}$  в діапазоні  $l_{\min}=(1,5-3)$  м практично не залежить від довжини електрично пробиваного в цій ДЕРС довгого повітряного проміжку високою або надвисокою імпульсною напругою  $U_{12}(t)=(\phi_1-\phi_2)$ , яка приймає при  $l_{\min}=1,5$  м чисельне значення біля  $U_{mcd} \approx 611,6$  кВ (див. рис. 4), а при  $l_{\min}=3$  м – приблизно  $U_{mcd} \approx 1062,3$  кВ (див. рис. 5). Конкретним підтвердженням тому є те, що у використовуваній повітряній ДЕРС «вістря-площина» ( $l_{\min}=3$  м), яка випробовує дію стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс, усереднена швидкість  $v_L$  просування в атмосферному повітрі плазмового каналу позитивного лідера імпульсного іскрового розряду з урахуванням емпіричної формули (1) при  $l_{\min}=3$  м і  $T_{dc} \approx 33$  мкс чисельно складає біля  $v_L \approx 1,03 \cdot 10^5$  м/с. Це кількісне значення для  $v_L$  (при  $l_{\min}=3$  м в повітряній ДЕРС) відрізняється не більше ніж на 3 % від раніше отриманого нами на основі запропонованого тут розрахунково-експериментального методу кількісного визначення усередненої швидкості  $v_L$  просування в повітрі позитивного лідера довгого іскрового розряду при електричному пробое в тій же ДЕРС розрядного повітряного проміжку мінімальною довжиною  $l_{\min}=1,5$  м чисельного значення для  $v_L$ , що становить приблизно  $v_L \approx 0,997 \cdot 10^5$  м/с. Реальний шлях завдовжки  $l_c$  просування в міжелектродному проміжку повітряної ДЕРС позитивного лідера іскрового розряду в цьому випадку ( $l_{\min}=3$  м;  $T_{dc} \approx 33$  мкс;  $v_L \approx 1,03 \cdot 10^5$  м/с) буде чисельно рівним біля  $l_c \approx v_L T_{dc} \approx 3,399$  м, що приблизно на 13 % перевищує вказану мінімальну довжину  $l_{\min}=3$  м розрядного повітряного проміжку в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина». При істотно меншій швидкості  $v_L$  просування позитивного лідера розряду в повітрі ДЕРС «вістря-площина» (наприклад, при  $v_L \approx 1,5 \cdot 10^4$  м/с, див. рис. 5.36 в [3]), у якій електричний пробій її розрядних проміжків ( $l_{\min}=1,5$  м і  $l_{\min}=3$  м) обумовлюється також подачею на її відповідні електроди стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої ( $U_{mcd} \approx 611,6$  кВ) або надвисокої ( $U_{mcd} \approx 1062,3$  кВ)

напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності, для реально зафіксованих нами чисельних значень тривалості їх зрізу  $T_{dc}$  (відповідно рівних  $\sim 17$  мкс і  $\sim 33$  мкс згідно даних рис. 4 і рис. 5) проходження ним (подібним позитивним лідером розряду) вказаних реальних шляхів завдовжки  $l_c \approx v_L T_{dc}$  (у першому випадку для  $l_c \approx 1,695$  м, а в другому –  $l_c \approx 3,399$  м) стає принципово неможливим. При вказаній швидкості  $v_L \approx 1,5 \cdot 10^4$  м/с [3] для проходження таким лідером розряду використовуваних довжин  $l_c > l_{\min}$  будуть потрібні значення  $T_{dc}$ , які повинні чисельно складати не менше (110–220) мкс, що буде суперечити умовам і реаліям проведених нами надвисоковольтних експериментів. В зв'язку з цим відомі дослідні дані, які приведені в [7] (див. табл. 17.2) для найменшої середньої швидкості  $v_L \approx 10^5$  м/с просування в атмосферному повітрі негативного лідера блискавки, мають більшу достовірність. Фізика розвитку лідерного пробою довгих повітряних проміжків як в природних, так і в лабораторних умовах, не дивлячись на значну різницю при цьому в рівнях надвисокої напруги  $U_{12}(t)$ , при  $dU_{12}(t)/dt \geq 5$  кВ/мкс повинна залишатися однаковою. Отримані за допомогою запропонованого розрахунково-експериментального методу дані для усередненої швидкості  $v_L$  просування в атмосферному повітрі позитивного лідера імпульсного іскрового розряду в ДЕРС «вістря-площина» при  $l_{\min} = (1,5-3)$  м доповнюють і уточнюють маловивчені в світі електрофізичні особливості прояву механізмів лідерного пробою довгих повітряних проміжків у використовуваній ДЕРС «вістря-площина» з різко неоднорідним сильним імпульсним електричним полем.

З урахуванням приведених в цій роботі наближених чисельних даних для  $v_L$  і мінімальної похибки вимірювання АЧП використовуваних в проведених експериментах за допомогою повітряної ДЕРС «вістря-площина» стандартних комутаційних аперіодичних імпульсів над- і високої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності, яка складає не менше 3 % [16, 17, 20], можна вважати, що усереднена швидкість  $v_L$  розповсюдження в атмосферному повітрі цієї ДЕРС переднього фронту позитивного лідера в плазмовому каналі імпульсного іскрового розряду чисельно складає біля  $v_L \approx (1 \pm 0,03) \cdot 10^5$  м/с.

**3. Розрахунково-експериментальна оцінка короткочасної електричної міцності довгих повітряних проміжків.** Тут важливо підкреслити те, що електрична міцність повітряної ізоляції в електроенергетиці і ВІТ визначається і вибирається, виходячи з дії на неї наступних двох форм імпульсів над- і високої напруги [1, 3, 16]: по-перше, стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу; по-друге, стандартного коливального загасаючого синусоїдального імпульсу. Отримання подібних даних для довгих повітряних проміжків (для  $l_{\min} = (1-10)$  м) при імпульсній напруги рівнем  $U_{12}(t) = (1-5)$  МВ пов'язано з великими технічними труднощами і матеріальними витратами. В цьому випадку необхідно надійно захищати від виникаючих електричних перенапруг як основні електропристрої самого надвисоковольтного випробувального електростаткування, так і зв'язані з ним зовнішні живлячі електропристрої [1, 2]. Крім того, при цьому потрібно передбачати особливі заходи як з техніки безпеки, так і по запобіганню можливих електричних пробивів ізоля-

ції використовуваних електропристроїв [1, 3, 17]. У зв'язку з цим розрахунково-експериментальні результати, які представлені вище для надвисоковольтної повітряної ДЕРС «вістря-площина», яка відноситься до однієї з основних базисних розрядних систем [1, 3], можуть мати певне прикладне значення при виборі в області промислової електроенергетики і ВІТ мінімальних рівнів розрядних електричних напруг і пробивних напруженостей  $E_d$  сильного імпульсного електричного поля для довгих повітряних проміжків.

Враховуючи емпіричну формулу (1), для усередненого значення пробивної напруженості  $E_d$  сильного електричного поля в довгих повітряних проміжках досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» можна записати наступне розрахункове співвідношення:

$$E_d \approx \varphi_{1d} / (1,13 l_{\min}), \quad (2)$$

де  $\varphi_{1d}$  – електричний потенціал на краю верхнього електроду в досліджуваній ДЕРС при електричному пробіі її розрядного повітряного проміжку, який характеризується своєю мінімальною довжиною  $l_{\min}$ .

У прикладному випадку 1, коли  $l_{\min} = 1,5$  м, з (2) при  $\varphi_{1d} \approx \varphi_{1d1} \approx U_{mcd} \approx 611,6$  кВ (див. рис. 4) для усередненого рівня пробивної напруженості  $E_d = E_{d1}$  сильного імпульсного електричного поля у вказаному довгому повітряному проміжку ДЕРС «вістря-площина» отримуємо чисельне значення, приблизно рівне  $E_{d1} \approx 360,8$  кВ/м. Для прикладного випадку 2 при  $l_{\min} = 3$  м і  $\varphi_{1d} \approx \varphi_{1d2} \approx U_{mcd} \approx 1062,3$  кВ (див. рис. 5) з (2) знаходимо, що усереднене значення пробивної напруженості  $E_d = E_{d2}$  сильного імпульсного електричного поля в цьому довгому повітряному проміжку даної ДЕРС чисельно складає біля  $E_{d2} \approx 313,4$  кВ/м. Як бачимо, із збільшенням (у 2 рази з 1,5 м до 3 м) у досліджуваній ДЕРС з різко неоднорідним сильним імпульсним електричним полем мінімальної довжини  $l_{\min}$  її розрядного повітряного проміжку усереднене значення пробивної напруженості  $E_d$  в ній зменшується (приблизно на 13,1 % з 360,8 кВ/м до 313,4 кВ/м). Ці розрахунково-експериментальні результати для усередненої пробивної напруженості  $E_d$  сильного імпульсного електричного поля в повітряній ДЕРС «вістря-площина» при  $l_{\min} = (1,5-3)$  м добре узгоджуються з відомими в області електроенергетики даними, які стосуються мінімальної електричної міцності повітряних проміжків завдовжки  $l_{\min} = (1-4)$  м [1-3].

#### Висновки.

1. Запропонований наближений розрахунково-експериментальний метод визначення усередненої швидкості  $v_L$  просування плазмового лідерного каналу електричного імпульсного іскрового розряду в довгому повітряному проміжку ДЕРС «вістря-площина». Даний метод базується на запропонованій емпіричній формулі і дослідних даних для тривалості зрізу (комутації)  $T_{dc}$  імпульсів пробивної напруги, отриманих за результатами розшифрування осцилограм процесу зрізу стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу над- і високої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивної полярності при електричному пробіі у вказаній ДЕРС довгих повітряних проміжків з їх мінімальною довжиною  $l_{\min}$ , що дискретно змінюється в діапазоні  $l_{\min} = (1,5-3)$  м.

2. Показано, що усереднена швидкість  $v_L$  розповсюдження в атмосферному повітрі переднього фрон-

ту плазмового каналу позитивного лідера електричного імпульсного іскрового розряду в досліджуваній ДЕРС «вістря-площина» для двох розглянутих прикладних випадків при  $l_{\min}=1,5$  м  $l_{\min}=3$  м чисельно складає приблизно  $v_L \approx (1 \pm 0,03) \cdot 10^5$  м/с. Отриманий нами чисельний результат для  $v_L$  добре узгоджується з відомими дослідними даними для швидкості просування  $v_L \approx 10^5$  м/с в атмосферному повітрі плазмового каналу негативного лідера для довгого грозового іскрового розряду в ДЕРС «заряджена хмара-земля».

3. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що для стандартного комутаційного аперіодичного імпульсу високої і надвисокої напруги часової форми  $T_m/T_d \approx 200$  мкс/1990 мкс позитивній полярності усереднене значення пробивної напруженості  $E_d$  сильного імпульсного електричного поля в довгому повітряному проміжку досліджуваної ДЕРС «вістря-площина» мінімальною довжиною  $l_{\min}=1,5$  м чисельно складає біля  $E_{d1} \approx 360,8$  кВ/м, а для його мінімальної довжини  $l_{\min}=3$  м –  $E_{d2} \approx 313,4$  кВ/м. Отримані результати для  $E_d$  добре корелюють з відомими даними для мінімальної електричної міцності повітряних проміжків завдовжки  $l_{\min}=(1-4)$  м в досліджуваній повітряній ДЕРС «вістря-площина».

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

**Конфлікт інтересів.** Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бржезицький В.О., Білий І.В., Бойко М.І., Гуль В.І., Гурін А.Г., Ільєнко 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., Хоминіч 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 «ХПІ» – Торнадо, 2005. 930 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 391 с.
3. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский А.Е., Орлов А.В., Темников А.Г., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. *Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов.* – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 704 с.
4. Baranov M.I. A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 56-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.08>.
5. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal Action of the Pulse of the Current of a Short Artificial-Lightning Stroke on Test Specimens of Wires and Cables of Electric Power Objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 544-555. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.
6. 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.
7. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987, 592 с.
8. 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>.
9. 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>.
10. Hussein A.M., Janischewskij W., Chang J.-S., Shostak V., Chisholm W.A., Dzurevych P., Kawasaki Z.-I. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, vol. 100, no. D5, pp. 8853-8861. doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00543>.

11. Xia Y., Liu D., Wang W., Bi Z., Wang X., Niu J., Ji L., Song Y., Qi Z. Effects of previous ionization and excitation on the ionization wave propagation along the dielectric tube. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, vol. 49, no. 16, art. no. 165202. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/16/165202>.

12. 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>.

13. 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>.

14. Xiong Z., Robert E., Sarron V., Pouvesle J.-M., Kushner M. J. Dynamics of ionization wave splitting and merging of atmospheric-pressure plasmas in branched dielectric tubes and channels. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 27, art. no. 275201. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/27/275201>.

15. Кухлинг Х. *Справочник по физике* / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. М.: Мир, 1982. 520 с.

16. 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.

17. 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>.

18. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. Получение стандартных коммутационных импульсов высокого и сверхвысокого напряжения для натурных испытаний электроэнергетических объектов. *Электротехника і Електромеханіка*, 2013, № 2, С. 52-56.

19. Баранов М.І. *Вибрані питання електрофізики: Монографія у 4 томах. Том 4: Ефекти взаємодії фізичних тіл з полями і струмами.* Х.: «ФОП Панов А.М.», 2023. 552 с.

20. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 44-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.08>.

#### REFERENCES

1. Brzhezitsky V.O., Biliy 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., Khymentko L.T., Khominich V.I., Shostak V.O., Yanishevsky V.I. *Technique and Electrophysics of High Voltages*. Kharkiv, NTU «KhPI», Tomado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).
2. Knopfel' G. *Ultra strong pulsed magnetic fields*. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
3. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Verшинin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pintal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. *Electrophysics bases of HV technique*. Moscow, Publ. House of MEI, 2010. 704 p. (Rus).
4. Baranov M.I. A choice of sections of electric wires and cables in circuits of devices of high-voltage high-current impulse technique. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 6, pp. 56-62. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.08>.
5. Baranov M.I., Rudakov S.V. Electrothermal Action of the Pulse of the Current of a Short Artificial-Lightning Stroke on Test Specimens of Wires and Cables of Electric Power Objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 2, pp. 544-555. doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1775-2>.
6. 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 electrodynamic*, 2010, no. 5, pp. 69-74. (Rus).
7. Rayzer Yu.P. *Physics of gas discharge*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).

8. 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>.
9. 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>.
10. Hussein A.M., Janischewskyj W., Chang J.-S., Shostak V., Chisholm W.A., Dzurevych P., Kawasaki Z.-I. Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, vol. 100, no. D5, pp. 8853-8861. doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00543>.
11. Xia Y., Liu D., Wang W., Bi Z., Wang X., Niu J., Ji L., Song Y., Qi Z. Effects of previous ionization and excitation on the ionization wave propagation along the dielectric tube. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, vol. 49, no. 16, art. no. 165202. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/16/165202>.
12. 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>.
13. 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>.
14. Xiong Z., Robert E., Sarron V., Pouvesle J.-M., Kushner M. J. Dynamics of ionization wave splitting and merging of atmospheric-pressure plasmas in branched dielectric tubes and channels. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no. 27, art. no. 275201. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/27/275201>.
15. Kuhlning H. *Handbook of Physics*. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
16. 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).
17. 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>.
18. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. Generation of standard switching aperiodic impulses of high and superhigh voltage for full-scale tests of electrical power objects. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2013, no. 2, pp. 52-56. (Rus). doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2013.2.10>.
19. Baranov M.I. *Selected topics of Electrophysics. Monograph in 4 Vols. Vol. 4. Effects of interaction of physical bodies with fields and currents*. Kharkiv, FOP Panov A.N. Publ., 2023. 552 p. (Ukr).
20. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2018, no. 5, pp. 44-53. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.5.08>.

Надійшла (Received) 30.09.2023

Прийнята (Accepted) 16.11.2023

Опублікована (Published) 02.03.2024

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);

#### How to cite this article:

Baranov M.I. Calculation and experimental determination of the speed of advancement of the plasma leader channel of a pulse spark discharge in atmospheric air. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 2, pp. 48-54. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.2.07>

M.I. Baranov

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

#### Calculation and experimental determination of the speed of advancement of the plasma leader channel of a pulse spark discharge in atmospheric air.

**Goal.** Calculation and experimental determination of middle speed  $v_L$  of advancement of plasma leader channel of a pulse spark discharge in the long air interval of the double-electrode discharge system (DEDS) «tip-plane». **Methodology.** Bases of the theoretical electrical engineering and electrophysics, electrophysics bases of technique of ultra- and high-voltage and high pulse currents, bases of high-voltage pulse technique and measuring technique. **Results.** The close calculation and experimental method of determination of middle speed  $v_L$  of advancement of plasma leader channel of an electric pulse spark discharge is offered in the long air interval of DEDS «tip-plane». This method is based on the offered calculation empiric formula for finding of the indicated speed  $v_L$  and results of decoding of oscillograms of process of cut of in-use standard interconnect aperiodic pulse of over- and high-voltage of temporal shape of  $T_m/T_d \approx 200 \mu\text{s}/1990 \mu\text{s}$  of positive polarity at an electric hasp in indicated DEDS of long air intervals with their minimum length of  $l_{\min}$ , numeral making 1,5 m (first case) and 3 m (second case). It is shown that middle speed  $v_L$  of advancement in atmospheric air of front of plasma channel of positive leader of an electric pulse spark discharge in probed DEDS «tip-plane» for two considered applied cases at  $l_{\min}=1,5 \text{ m}$  of  $l_{\min}=3 \text{ m}$  numeral makes approximately  $v_L \approx (1 \pm 0,03) \cdot 10^5 \text{ m/s}$ . The found numeral value of this speed  $v_L$  well coincides with the known experimental information for speed of advancement of  $v_L \approx 10^5 \text{ m/s}$  in atmospheric air of plasma channel of negative leader for a long storm spark discharge in DEDS «charged cloud-earth». It is set that for the standard interconnect aperiodic pulse of high- and ultra- voltage of temporal shape of  $T_m/T_d \approx 200 \mu\text{s}/1990 \mu\text{s}$  of positive polarity middle value of aggressive strength  $E_d$  of high pulse electric field in the air interval of probed DEDS «tip-plane» numeral makes minimum length of  $l_{\min}=1,5 \text{ m}$  near  $E_{d1} \approx 360,8 \text{ kV/m}$ , and for his minimum length of  $l_{\min}=3 \text{ m}$  of  $E_{d2} \approx 313,4 \text{ kV/m}$ . **Originality.** The comfortable is developed in the use and reliable in practical realization technicians-and-engineers calculation and experimental method of research in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory of difficult electro-discharge processes of development of leader hasp of long air intervals and determination of minimum electric durability of air insulation of electrical power engineering and electrophysics equipment on working voltage of classes of 330-1150 kV. **Practical value.** Application in area of industrial electrical power engineering and high-voltage pulse technique of the got numeral electrophysics results and offered calculation and experimental method of determination of middle speed  $v_L$  of advancement in atmospheric air of plasma channel of leader of a long spark discharge will allow, from one side, to deepen our scientific knowledges about a long electric pulse spark discharge in an air dielectric, and, from other side, to develop high-voltage electrical power engineering and electrophysics devices with enhanceable reliability of their work both in normal operation and malfunctions. References 20, figures 5.

**Key words:** plasma leader channel, electric pulse spark discharge, air dielectric, advance speed of a spark discharge front, calculation, experiment.