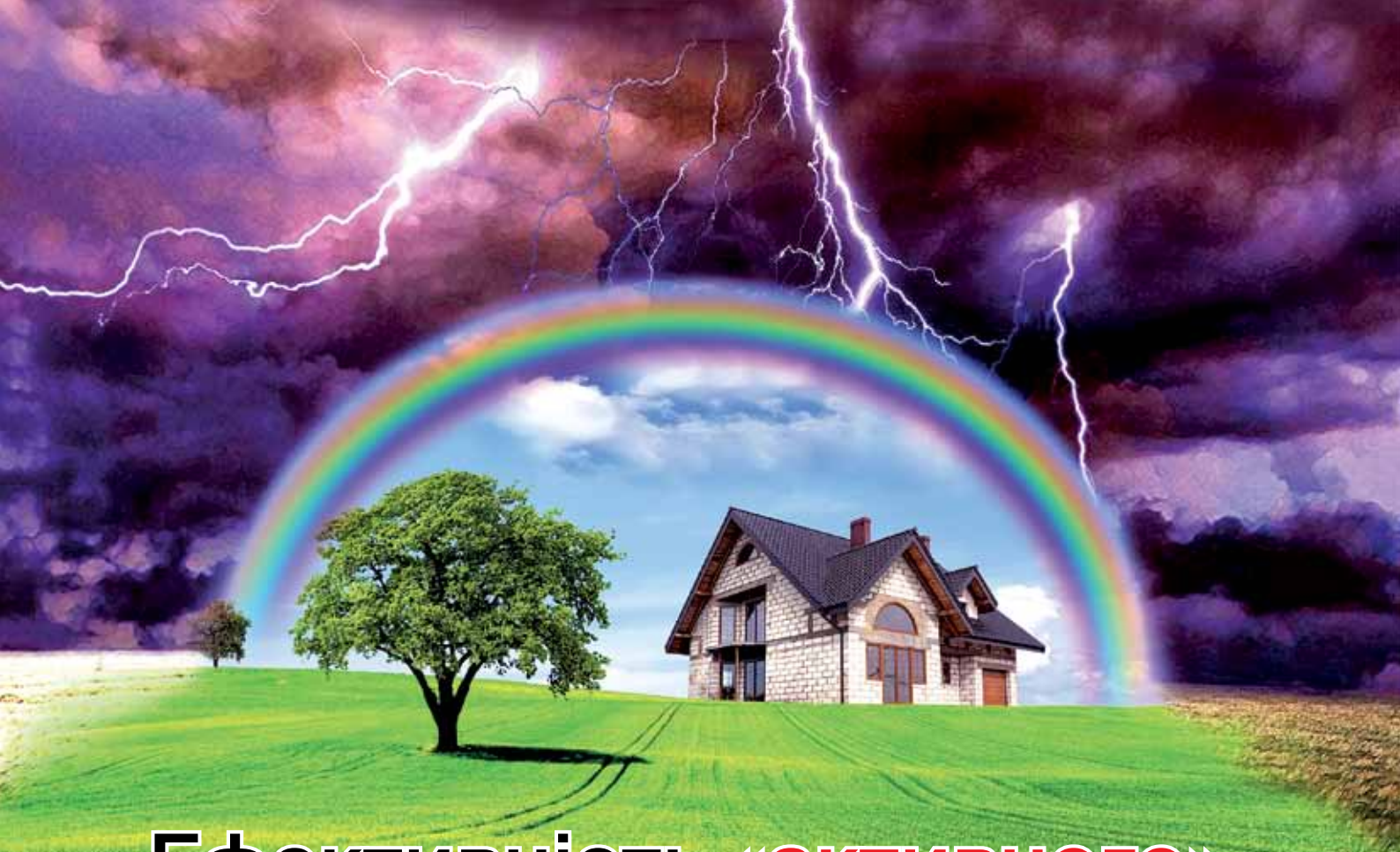




Ефективність «активного» блискавкозахисту

Фрідхельм НОАК

Продовжуємо обговорення проблем застосування «активного» блискавкозахисту, яке почалося публікацією «Упреждающая стримерная эмиссия – наука и практика» «СиБ», №5, 2012, с. 84–89 та продовжилося розгорнутим коментарем на порушену тему «ESE, або критика чистого розуму» «СиБ», №6, 2012, с. 52–57. З дозволу автора, професора, дипломованого інженера Фрідхельма Ноака з ФРН публікуємо переклад його статті статті, опублікованої ще 1999 року. Адже саме Німеччина відома у Європі своєю досконалою системою технічних норм з пожежної і техногенної безпеки VDE.

Як відомо, скорочення ESE-Terminal^{*)} походить від англійського Early Streamer Emission^{**)} Terminals. Цей термін використовується для визначення групи пристроїв з їхніми декларованими перевагами над звичайними перехоплювачами систем блискавкозахисту.

Усі ці пристрої призначено для покращення перехоплення ударів блискавки або навіть для відвернення виснаг блискавичних^{***)} завдяки збільшенню емісії іонів. Таким чином, надалі використовується термін «іонізуючий

^{*)} Англomовний термін, аналогічний поняттю «активний» блискавкозахист у нашій країні

^{**)} Рання емісія стримерів

^{***)} Виснаг блискавична – суто український відповідник англійського lightning discharge на відміну від кальки з російського «разряд молнии»

Автор

З 1995-го по 2003 роки Фрідхельм Ноак – член правління Співки німецьких електротехніків (комітет з будівництва блискавкозахисту). З 1983 по 1993 р. – Технічний інститут у місті Ільменау (Німеччина); професор електротехніки. З 1993 по 2004 р. – професор кафедри дослідження методів блискавкозахисту цього ж університету. У 2004 році вийшов у відставку.



Фрідхельм НОАК,
проф. технічного університету
Ільменау (Німеччина)

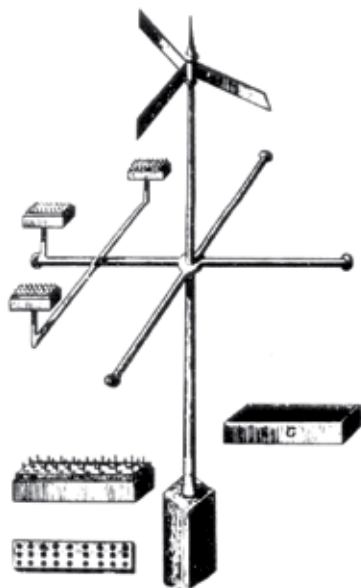


Рис. 1. Погодна машина Прокопа Дівіша (1754 рік)

перехоплювач» для визначення цих альтернативних захисних пристроїв.

Іонізуючі перехоплювачі

Існують традиційні перевірені заходи з зовнішнього блискавкозахисту, що використовуються понад 200 років, які пов'язані з двома альтернативними концепціями.

Повітря під грозовою хмариою іонізується завдяки використанню системи численних гострих шпів, встановлених на певній висоті, які електрично приєднані до землі. Цей процес спрямований на досягнення такого інтенсивного переносу зарядів між цим захисним пристроєм і грозовою хмариою, що це має взагалі запобігти розвитку розряду блискавки [У подальшому тексті ми свідомо замінили використаний перекладачем термін «виснаги блискавичні» на більш інтуїтивно зрозумілий «розряд блискавки» — Прим. ред.].

Завдяки штучно збільшеній іонізації на шпичаках перехоплювального пристрою його радіус захисту і ефективність

повинні бути збільшені завдяки генеруванню відземного стримера назустріч каналу блискавки, що наближається.

Існують різноманітні методи збільшення іонізації. Нижче наведено декілька з них.

Метод компенсації заряду

Ідея компенсації заряду із застосуванням іонізуючих шпичаків є добре відомою. Її було висунуто на початку ери наукового аналізу блискавкозахисту, коли було з'ясовано електричну природу розряду блискавки. 1754 року монах Прокоп Дівіш із Богемії описав «погодну машину» з 216 шпичаками, встановлену на висоті 14 м (згодом 40 м) та приєднану до землі ланцюгом (рис. 1).

Навіть Бенджамін Франклін на початку вважав, що грозова хмара може бути виснажена без грому і блискавки за допомогою загостреного стрижня. Однак у 1755 році внаслідок проведених експериментів він пересвідчився, що таким чином уникнути блискавки неможливо. Перехоплювачі бли-

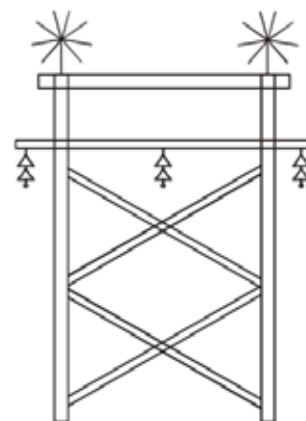


Рис. 2. SplineBalls у ролі коронуючих електродів на опорах ЛЕП 115 кВ

скавки мають бути електрично приєднані до землі, аби вона була відведена у землю безпечним чином.

Хоча неефективність цієї ідеї та застосування коронуючих електродів було з'ясовано віддавна, схожі проекти, що застосовують цей дідівський метод, знову й знову продовжуються у США.

Один із цих проектів проходив комплексне експериментальне дослідження у Держуніверситеті штату Міссісіпі під егідою American Power Supply Company [1]. Було поставлено задачу з'ясувати

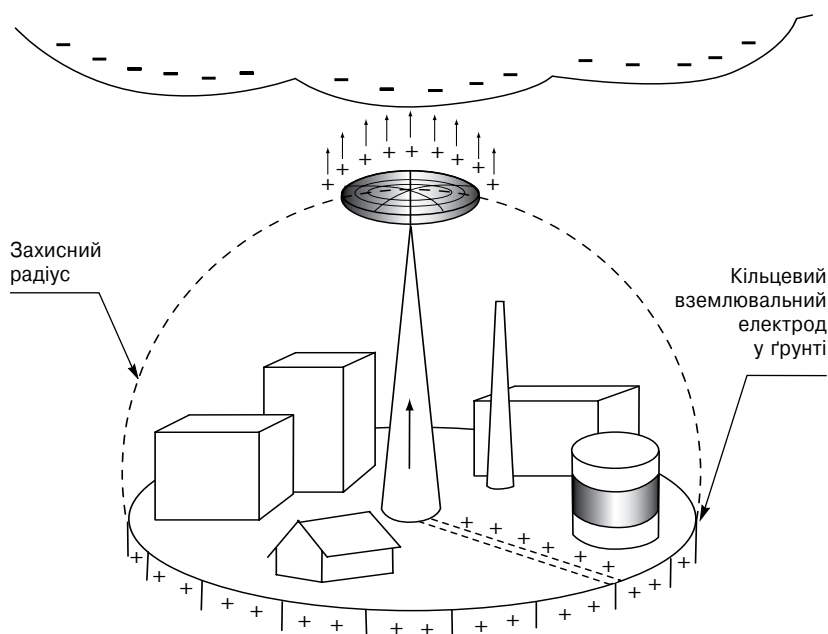


Рис. 3. Захисна концепція відвернення ударів блискавок у об'єкт

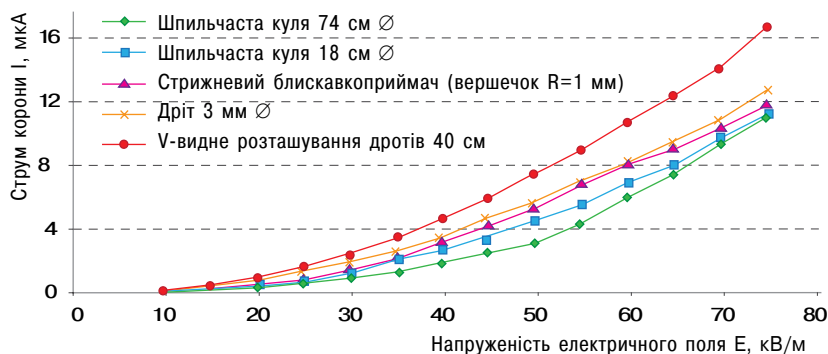


Рис. 4. Емісійні струми корони пасивних блискавкоприймачів [2] за відстані між ними та плоским електродом у 3 м

можливість відвернення ударів блискавки у повітряну ЛЕП 115 кВ встановленням на її дерев'яних опорах (рис. 2) великих «шпильчастих куль» (Spline Balls) діаметром 1,2 м.

Ще далі простягаються концепції компанії Lightning Eliminators & Consultants з міста Боулдер, штат Колорадо (рис. 3). Навкруги захищуваного об'єкта у ґрунті прокладається кільцевий електрод. Додатний заряд під грозовою хмарию збирається і відводиться кабелем до сіткоподібного розрядного пристрою, що встановлюється високо над об'єктом і має вигляд парасольки з численними невеличкими шпичаками. Тліючі розряди забезпечують інтенсивний перенос зарядів під дією електричного поля; таким чином відбувається зрівнювання потенціалів з грозовою хмарию, а різниця

потенціалів зменшується до такого рівня, що робить неможливим виникнення блискавки. Стверджується, що ця концепція здатна захистити від прямого удару блискавки не лише великі виробничі площі, нафтопереробні підприємства і паливні танки, а навіть аеропорти.

Однак цей широкомасштабний екрануючий ефект не може бути доведеним. Модельні експерименти у високовольтних лабораторіях показали, що просторові заряди, які формуються над такими виснажними системами, можуть відвернути розвиток відземного лідера, але не доземного, який проростає від хмари. Це означає, що у випадку доземного лідера відземний лідер може виникнути лише на коротшій відстані між голівкою блискавки та захисним екраном, і це робить його схожим на звичайний пе-

рехоплювач блискавки. Скоріше за все, видається неможливим відвернути удар блискавки таким чином. Може бути, що так вдасться відвернути певну кількість відземних лідерів завдяки встановленню цієї системи на дуже високих об'єктах. З іншого боку, відомо, що навіть у випадку дуже високих об'єктів мають місце розряди з тривалими струмами.

На низці випробувальних майданчиків було отримано результати всебічних порівняльних вимірювань емісійного струму корони для різних форм пасивних блискавкоприймачів (стрижні з тупим або загостреним вершечком, шпильчасті кулі, звичайні дроти, V-видні системи з дротів) та доповнено їх результатами інших випробувань.

Емісійні струми корони зростають зі збільшенням напруженості електричного поля постійного струму, але досить важко помітити якусь різницю між різними блискавкоприймачами (рис. 4).

Результати є однозначними: усі конструкції коронуючих електродів та загострених шпичаків не емітують зростаючий струм корони, вони, безумовно, є неефективними у ролі виснажних систем та легко можуть бути замінені V-видними системами тросів! До того ж для

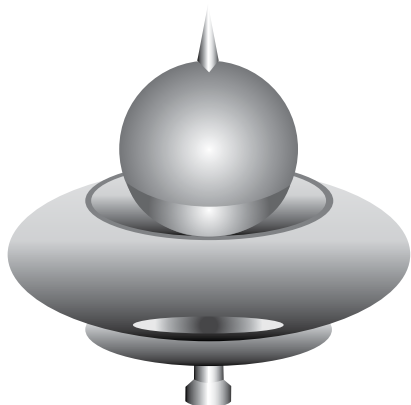


Рис. 5. Радіоактивний блискавкоприймач



Рис. 6. Версії перехоплювачів блискавки зі штучно збільшеною іонізацією (ESE-пристрої)

всіх емісійних процесів слід рахуватися з дією вітру. За швидкості руху додатніх іонів 1 м/с у електричному полі напруженістю 10 кВ/м вітер швидкістю у 5 км/год (або навіть менше) легко видмухує ті іони геть [3].

Методи штучної іонізації

Радіоактивні блискавкоприймачі. Ідея використання радіоактивності для зросту іонізації блискавкоприймачів сягає у минуле до угорського фізика Лео Сцилларда (Leo Szilard, 1914 р.). Від того часу отримано численні патенти, а блискавкозахисні системи з джерелом радіоактивності було встановлено приміром у Франції та Італії. Хоча регуляційні норми з радіаційного захисту багатьох країн посуворішали, подібні блискавкоприймачі енергійно пропонуються у США (рис. 5).

Найчастіше у таких типах перехоплювачів у якості радіоактивного матеріалу трапляється Америцій 241. Він висилає м'яке α -випромінювання та має довгий період напіврозпаду, постійно іонізуючи молекули повітря. Іони транспортуються до вершечка або внаслідок циркуляції повітря, або під дією електричного поля. Іонізація характеризується низькою інтенсивністю іонного струму та малим радіусом.

Перехоплювачі імпульсної напруги. Було розроблено різноманітні пристрої для генерування високовольтних часткових розрядів, аби іонізувати повітря безпосередньо у розрядному проміжку. Якись із них обладнано батареями або сонячними модулями, інші беруть енергію від електричного поля. Ефективність високовольтних імпульсів, генерованих джерелом імпульсної напруги, забезпечується спеціальними або ковзними іскровими проміжками. Сучасні конструкції базуються на іонізації, керованій залежно від напруженості поля. На рис. 6 показано декілька версій іонізаційних перехоплювачів блискавки (ESE-пристроїв).

Розвиток розряду блискавки

Перед тим як докладніше висвітлити очікуваний вплив іонізуючих перехоплювачів на захист від блискавки, буде показано розвиток у часі процесів розряду.

Коли між грозовою хмарою та землею сформувався потужне електричне поле, розряд ініціюється ступінчастим розвитком низобіжного лідера каналу блискавки (ступінчастого лідера). У міру розвитку ступінчастого лідера напруженість поля між ним і вземленими предметами зростає, і осо-

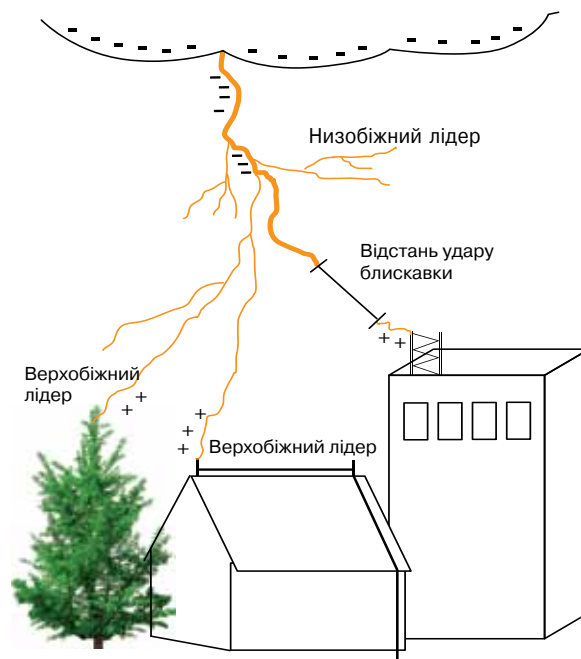


Рис. 7. Розвиток розряду блискавки

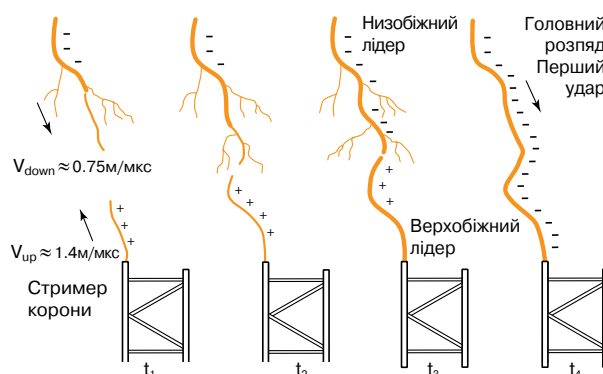
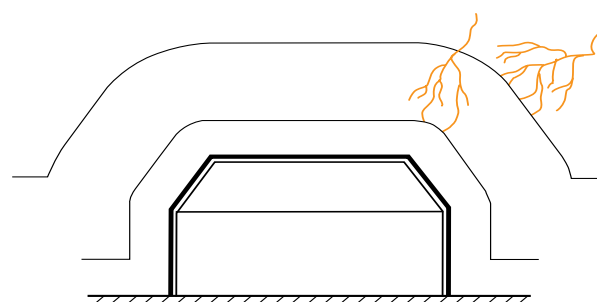


Рис. 8. Стадії розвитку розряду блискавки



$$d = 10 \cdot I^{0.65}$$

$$d = 2 \cdot I + 30 \cdot [1 - e^{-I/0.68}]$$

сила струму у формулах задається в кА

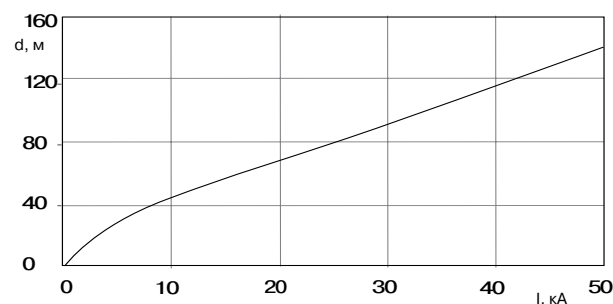


Рис. 9. Відстань удару блискавки

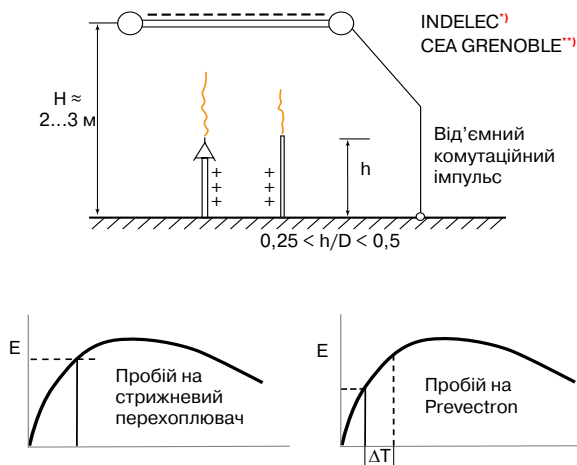


Рис. 10. Порівняння часу випускання стримера від дії комутаційного імпульсу

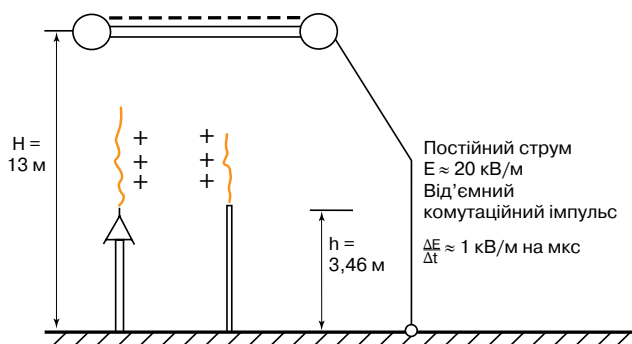


Рис. 11. Порівняння часу випускання додатнього стримера/лідера [8] (1994 р.)

бливо високі об'єкти, як от башти, вершини гір, дерева, будинки випускають верхобіжні лідери. Спочатку ці лідери не супроводжуються значними струмами (емісійна корона, стример), але згодом обертаються на верхобіжні лідери з великими струмами (рис. 7, 8).

Це відбувається саме у той момент, коли голівка лідера знаходиться близько землі (біля 100 м) та лідери повертають назустріч один одному. На певній відстані від землі низобіжний лідер з голівкою блискавки «визначає» місце ураження з оптимальною відстанню удару для останнього стрибка. Головний розряд проходить цим приготовленим каналом блискавки, за якою йдуть інші розряди (подальші удари блискавки).

Чим вищий струм розряду, тим більшою є відстань удару блискавки [4]. Це означає, що блискавка з більшим струмом «розпізнає» вземлений об'єкт для удару раніше. Тобто відстань є більшою порівняно з блискавкою, що має меншу величину струму і яка обирає об'єкт на меншій відстані від нього. На рис. 9 представлено відстані перехоплення навколо споруди залежно від струму блискавки.

Це означає, що провідник блискавкозахисту, встановлений на певній висоті, забезпечує кращий захист для його оточення від потужних блискавок, ніж від тих, які мають менший струм.

Захищений простір визначається зазвичай за «методом сфери, що котиться» або за «методом захисного кута» (IEC ENV 61024-1, VDE V 0185, Part 100***).

*) INDELEC – створене у 1955 р. об'єднання компаній зі штаб-квартирою у Франції, де 1986 р. було винайдено Prevectron, один з перших ESE-пристроїв

**) Французьке управління Комісії з ядерної енергетики у Греноблі
 ***) Зазначені методи визначено також діючими національними нормами: ДСТУ EN 62305 (Lightning Protection) та ДСТУ Б В.2.5-38:2008 – «Улаштування блискавкозахисту будівель і споруд»

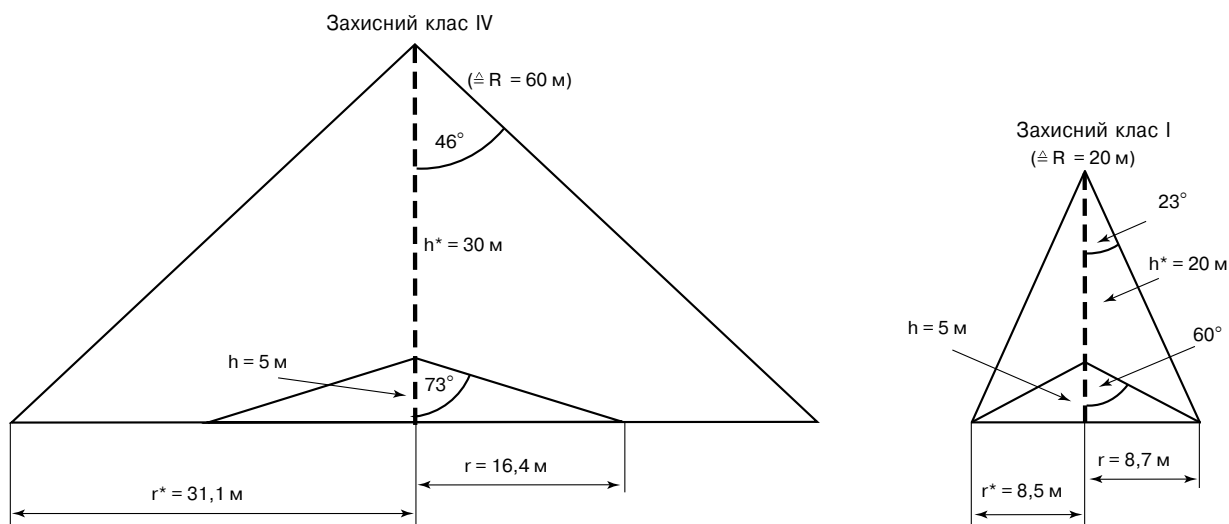


Рис. 12. Розширення захищеного простору перехоплювача блискавки за припущення, що віртуальна довжина перехоплювача значно збільшується: захисний клас IV: збільшення висоти від $h = 5$ м до $h^* = 30$ м; захисний клас I: збільшення висоти від $h = 5$ м до $h^* = 20$ м.

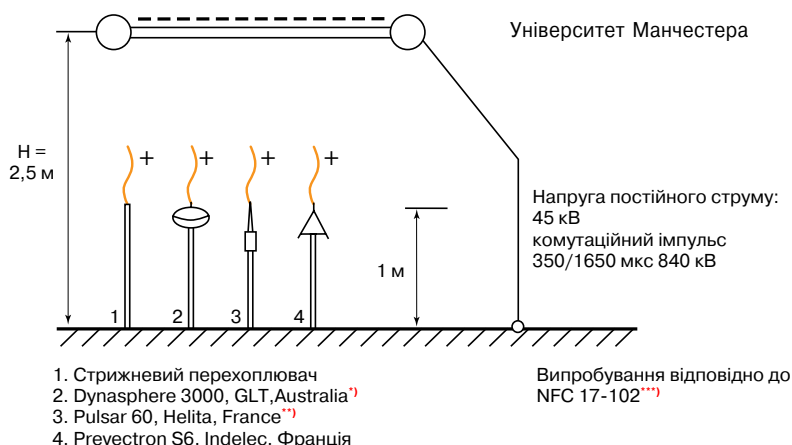


Рис. 13. Порівняння частот перекриття

Дієвість іонізуючих блискавкоприймачів — вплив на захист від блискавки

Вже понад 10 років деякі фірми нарощують активність у розробленні іонізуючих блискавкоприймачів у намаганні довести їхню ефективність. По сьогоднішній день ці випробування проводилися лише у високовольтних лабораторіях. 1997 року було проведено випробування (рис. 10), аби порівняти здатність до перехоплення звичайного стрижня (Franklin terminal) та ESE-пристрою [5] у іскровому проміжку з плоским електродом, на який подавалися комутаційні імпульси. У цих експериментах було з'ясовано, що у обох випадках змінювався час формування пробою проміжку, але ESE-пристрої реагували на $\Delta T = 20 \dots 50$ мкс швидше.

Переважно Бергером бу-

ло проведено численні випробування у намаганні підтвердити ефективність ESE-перехоплювачів [6, 7, 8].

Було перевірено появу коронного розряду у проміжку з плоским електродом під потенціалом постійного струму, на який накладався комутаційний імпульс (рис. 11).

Бергером було з'ясовано (1992 р.), що у цих умовах емісія стримерів або лідерів від іонізуючих перехоплювачів розпочинається на $\Delta T = 10 \dots 50$ мкс раніше, ніж зі звичайних стрижневих перехоплювачів.

За цієї часової різниці $\Delta T = 10 \dots 50$ мкс Бергер зробив висновок, що лідер іонізаційного блискавкоперехоплювача з очікуваною швидкістю у $v =$

106 м/с розвинеться на відстань

$$\Delta L = v \cdot \Delta T = 10^6 \text{ м/с} \cdot (10 \dots 50) \cdot \text{мкс} = 10 \dots 50 \text{ м}$$

доки розпочнеться емісія зі звичайного стрижня. Це буде означати, що іонізаційний блискавкоперехоплювач виявляється віртуально довшим.

З цього було зроблено такі висновки:

— суттєве збільшення захисної дії, забезпеченої іонізаційним блискавкоперехоплювачем у порівнянні зі звичайним стрижневим перехоплювачем;

— значне збільшення захищеного простору (радіус до 100 м);

— значне скорочення числа стрижневих перехоплювачів.

Наступні дві схеми демонструють вплив на захищуваний простір. Його розміри на рис. 12 основано на захисному куті відповідно до ENV 61024-1: 1995 (VDE V 0185, Part 100). Особливо для класу блискавкозахисту IV (з найменшою ефективністю захисту), захищений простір буде розширено найбільш суттєво.

Це припускне «покращення» захисного ефекту, що забезпечується іонізуючими перехоплювачами блискавки,

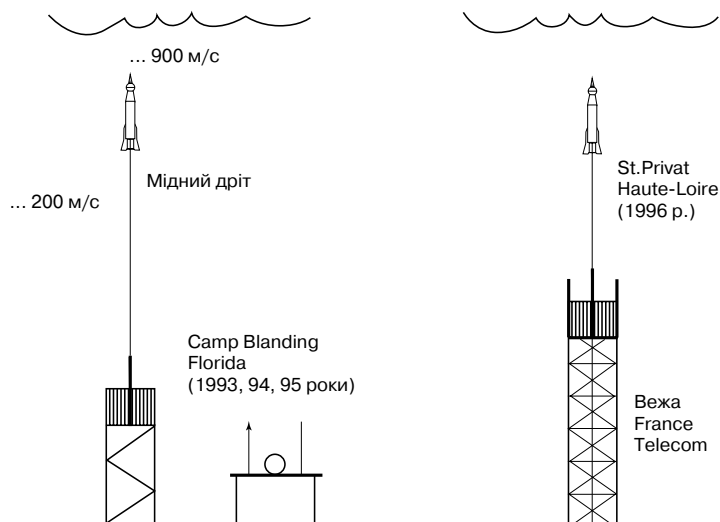


Рис. 14. Випробування перехоплювачів на станції тригерування блискавок

^{*)} Нерадіоактивний іонізуючий перехоплювач, пріоритет від 1988 р. (автор винаходу John Richard Gumley, заявник Erico International Corporation, США), розроблений у Lightning Protection International Pty Ltd, Австралія

^{**)} Нерадіоактивний іонізуючий перехоплювач, пріоритет від 1988 р. за патентом CNRS/Hélita, (лабораторія досліджень плазми, Франція)

^{***)} NFC 17-102: Французький стандарт з блискавкозахисту. Перша національна норма, якою було визначено небувало великий захищений простір іонізуючих перехоплювачів

ґрунтується на теоретичних положеннях, які не є перевіреними ані науково, ані експериментально.

Критична оцінка захисної дії іонізуючих перехоплювачів блискавки

Існує кілька фізичних положень [4, 9], які суперечать висновкам щодо поведінки іонізуючих перехоплювачів блискавки:

— Припускна стала швидкість лідера у 10^6 м/с є нереалістичною. Лідери природних блискавок характеризуються початковою швидкістю від 1...2 см/мкс й до 100 м/мкс лише у останні мікросекунди перед ударом. Середня швидкість біля 2×10^4 м/с має бути більш реалістичною.

— Для розвитку лідера напруженість електричного поля на його вершечку мусить сягати принаймні 0,5 МВ/м. Така напруженість поля зазвичай є характерною для верховіжного лідера за коротшої відстані до лідера низовіжного. Лідери, віддалені від низовіжного, приміром ті, що випускаються іонізуючими перехоплювачами, характеризуються меншою напруженістю поля і не можуть з цієї причини бути забезпечені достатньою енергією поля для розвитку свого зростання.

Високовольтні лабораторні випробування, проведені виключно виробниками іонізуючих блискавкоприймачів або їхніми прибічниками, не може бути повторено (1998). Випробування, які виконано незалежними інститутами університетів [10, 11], показали, що розряди у звичайні стрижні та у іонізуючі перехоплювачі різноманітяться та що області взаємно перекриваються. Лише один з іонізуючих перехоплювачів призводив до скорочення середнього часу розряду у порівнянні зі звичайним стрижнем, усі інші типи мали такий самий або довший час розряду.

Пряме порівняння розрядних властивостей звичайних стрижнів та іонізуючих блискавкоприймачів у високовольтній лабораторії (рис. 13) було проведено за ідентичних електричних і геометричних умов для усіх застосувань. 47,6% розрядів влучило у звичайний стрижень, тоді як 39,3% — у іонізуючий перехоплювач. До того ж 13,1% розрядів виявились нездатними пробити проміжок [12].

Результат, отриманий з цих випробувань, демонструє цілком випадкову природу розрядів: незважаючи на відносно короткий іскровий проміжок, збільшена частота вловлення розрядів іонізуючим блискавкоприймачем не може бути встановлена.

Кампанія випробувань групи виробників, запроваджена для підтвердження ефективності їхніх іонізуючих блискавкоприймачів, яка тривала протягом років, не принесла переконливих результатів [13]. Було побудовано та випробувано моніторингову систему для вимірювань струмів корони на блискавкоприймачах у Camp Blanding, Florida 1993-го, 1994-го та 1995-го років (рис. 14). Однак було записано лише дуже слабкі сигнали; робочий сигнал, який виникав самочинно у відповідь на зміни електричного поля внаслідок близьких блискавок, є лише трохи вищим.

Протягом тригерування блискавок 1996 р. у St. Privat, Haute Loire (див. рис. 14) передбачалося отримати удари блискавок у іонізуючий перехоплювач. Було розповсюджено відомості, що цей перехоплювач здатен витримати струм у 30 кА. Однак немає інформації про те, чи були інші удари блискавки або чи є перехоплювач надалі у робочому стані, ані про те, чи були удари блискавки у традиційні вземлені стрижні.

Висновки

Деклароване збільшення ефективності захисту іонізуючих блискавкоприймачів є надто контраверсійним з наукового погляду через недостатність знань щодо процесів розряду блискавок та труднощів у їхній симуляції.

Порівняльні випробування, проведені у високовольтних лабораторіях в умовах, близьких до реальних, з урахуванням стохастичного характеру процесів пробою, ведуть до висновку, що іонізуючі перехоплювачі демонструють таку ж поведінку і ефект, як і звичайні стрижневі блискавкоприймачі.

Є вкрай необхідним застерегти від використання декларованого великого захищеного простору іонізуючих перехоплювачів, встановлюючи ESE-блискавкоприймачі.

ESE-блискавкоприймачі не зазначені у стандартах МЕК і Німеччини; це означає, що громовідхильники з ESE не відповідають цим стандартам і не можуть бути прийняті в експлуатацію під час заключної інспекції^{*)}.

^{*)} Те ж саме є справедливим стосовно стандартів з блискавкозахисту України, Росії, Білорусі та Польщі (як і інших країн ЄЕС, за винятком Франції та Португалії)

Текст переклав
Євген БАРАННИК