

СИНТЕЗ ЛІНГВІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ВПЛИВУ БЛИСКАВКИ НА ЧАСТОТУ ВІДМОВ ЕКРАНУВАННЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

Проблематика. Традиційні методи розрахунку систем блискавкозахисту з часом удосконалюються з урахуванням нових знань про блискавку та її характеристики. Зростаючі вимоги до ефективності захисту, особливо для ліній електропередавання в концепції Smart Grid, створюють потребу в нових підходах. Нечітка логіка виступає як один із способів вирішення цих завдань, оскільки вона дозволяє моделювати складні і невизначені процеси, що характерні для блискавкозахисту. **Мета дослідження.** Основною метою є розробка лінгвістичної моделі для прогнозування частоти відмов екранування на основі параметрів струму блискавки, ширини зони відмови та функції щільності ймовірності струму. **Методика реалізації.** Для визначення ширини зони відмови екранування використано електрогеометричну модель. Синтез лінгвістичних моделей для відтворення впливу блискавки на частоту відмов екранування виконано за допомогою математичного апарату нечіткої логіки. **Результати дослідження.** Отримано дані щодо ширини зони відмови блискавкозахисту для типової опори лінії електропередавання 330 кВ, які демонструють, як змінюється ця зона при різних значеннях очікуваного струму блискавки. **Висновки.** Моделювання частоти відмов екранування за допомогою нечіткої логіки та алгоритму Мамдани дозволяє більш точно прогнозувати відмови, враховуючи мінливі умови. Структурні схеми та передаточні функції демонструють, як різні параметри, такі як струм, щільність струму та ширина зони відмови, впливають на частоту відмов. Усі ці параметри та їх взаємозв'язки описуються з використанням лінгвістичних змінних та нечітких правил, що дає змогу здійснювати більш ефективні прогнози для систем блискавкозахисту.

Ключові слова: блискавка, електрогеометрична модель, частота відмов екранування, повітряна лінія електропередавання, лінгвістичні моделі, нечітка логіка, розумні мережі, прогнозування відмов.

Вступ

Традиційні підходи до розрахунку систем блискавкозахисту формувалися протягом десятиліть і продовжують удосконалюватися й до сьогодні [1]. На своєму історичному етапі вони довели свою ефективність, адже дозволяли забезпечити дієвий захист від блискавки для різних об'єктів. Однак з часом, у зв'язку зі зростанням наших знань про блискавку та її характеристики, а також з підвищенням вимог до ефективності систем блискавкозахисту – особливо для повітряних ліній електропередавання, які є частиною концепції Smart Grid – виникає потреба в пошуку нових підходів для удосконалення розрахунків і аналізу ефективності таких систем [2, 3]. Ці зміни вимагають більш гнучких та інноваційних методів, здатних забезпечити ще вищий рівень надійності і безпеки.

Використання математичного апарату нечіткої логіки може бути одним із ефективних шляхів вирішення сучасних завдань захисту від блискавки повітряних ліній електропередавання. Нечітка логіка дозволяє ефективно моделювати складні та невизначені процеси, які мають місце в системах захисту від блискавки [4, 5]. Вона дає змогу врахувати різні параметри, такі як струм блискавки, функція щільності ймовірності струму та ширина зони відмови блискавкозахисту, де точні математичні моделі можуть бути важкими для застосування через високий рівень невизначеності або складність взаємозв'язків. Зокрема, нечіткі системи дозволяють описувати ці параметри мовою, що ближча до природної, наприклад, у вигляді "низький струм" чи "висока ймовірність", що робить модель більш адаптованою до реальних умов і дає змогу здійснювати ефективніші прогнози та приймати управлінські рішення у системах захисту.

Застосування нечіткої логіки може дати змогу краще прогнозувати і зменшувати ймовірність відмов блискавкозахисту в залежності від змінних умов, підвищуючи надійність і ефективність захисту повітряних ліній електропередавання та підстанцій високої напруги.

Мета та завдання

Основною метою даного дослідження є синтез лінгвістичної моделі впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування. Екрануючі (грозозахисні) троси знижують ймовірність прямого удару блискавки у фазні провідники, проте вони не можуть повністю виключити такий ризик, що підтверджується результатами численних розрахунків [3, 6], проведених за допомогою електрогеометричної моделі.

У рамках концепції Smart Grid, яка передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій для покращення ефективності та надійності електричних мереж, значення захисту від блискавки стає ще більш критичним. Високий рівень автоматизації та дистанційного моніторингу в таких мережах посилює вимоги до безперебійної роботи ліній, адже навіть короточасні порушення можуть призвести до серйозних системних збоїв або пошкодження обладнання. Тому, застосування математичного апарату нечіткої логіки для моделювання та аналізу відмов блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання є актуальним завданням.

Матеріал і результати досліджень

Одним із основних параметрів, якими характеризують ефективність блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання є частота відмов блискавкозахисту або, іншими словами, частота відмов екранування (Shielding Failure Rate в науковій англomовній літературі). Це очікувана кількість спалахів блискавки, які зможуть оминати екрануючий (грозозахисний) трос та влучити у фазний провідник за певний часовий інтервал. Зазвичай, обчислюється як кількість таких спалахів на 100 км довжини повітряної лінії електропередавання за 1 рік. Ця подія може спричинити електричне перекриття ізоляції з провідника на заземлену траверсу, а може і не спричинити цього. З урахуванням уточнення [7], даний параметр обчислюється за наступною формулою [8]:

$$SFR = 2 \times 10^{-3} \cdot N_g \cdot L \cdot \int_{I=I_{\min}}^{I=I_{\max}} D(I) \cdot f(I) \cdot dI, \quad (1)$$

де: SFR – частота відмов екранування, 1/рік; N_g – щільність спалахів блискавки між хмарою та землею для території, де проходить траса лінії електропередавання, 1/(км²×рік); L – довжина траси лінії електропередавання, км; I – очікуваний струм блискавки, кА; $D(I)$ – ширина зони відмови блискавкозахисту для даного фазного провідника, м; $f(I)$ – функція щільності ймовірності струму блискавки, 1/кА; $I_{\min}$ – мінімальний струм блискавки, прийнятий у розрахунку, кА; $I_{\max}$ – максимальний струм блискавки, при якому досягається повне екранування, кА.

В формулі (1) мінімальний струм ($I_{\min}$) можна прийняти рівним 3,0 кА, оскільки струмів першого зворотного удару блискавки менше цього значення не спостерігалось при вимірюваннях в польових умовах на опорах повітряних ліній електропередавання [9]. Розрахунки також показують достатньо малу ймовірність такої події. Так, ймовірність того, струм блискавки (як випадкова величина) прийме значення менше або рівне певному пороговому значенню, можна оцінити за наближеною формулою [8]:

$$P(I_f \leq I) = 1 - P(I_f > I) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31,0}\right)^{2,6}}. \quad (2)$$

Дійсно, за підрахунками за формулою (2), ймовірність того, що під час спалаху блискавки максимальне значення струму першого зворотного удару буде менше або рівне 3,0 кА, дорівнює 0,0023 (або 0,23%).

В даній роботі для опису функції щільності ймовірності струму блискавки як випадкової величини було використано наступний вираз:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot I \cdot 0,61} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(I) - 3,401}{0,61} \right)^2}. \quad (3)$$

Формула (3) відповідає результатам прямих вимірювань струму блискавки да дослідницьких вежах на горі Монте-Сан-Сальваторе в минулому столітті [10], які до сих пір вважаються одними з найбільш точних, та дуже близько наближаються до результатів вимірювань на опорах повітряних ліній електропередавання [9]. Відповідний аналіз та порівняння проведено в роботі [7].

В якості тестової моделі для дослідження за допомогою електрогеометричної моделі в даній роботі було використано креслення типової опори повітряної лінії електропередавання класу 330 кВ з горизонтальним розташуванням фазних провідників на опорі, яке наведено в публікації з відкритим доступом [11]. Для даної лінії було проведено розрахунки ширина зони відмови блискавкозахисту D для крайнього фазного провідника лінії. Процедура розрахунку наведено із необхідними поясненнями в публікації у відкритому доступі [7]. Оскільки процедура розрахунку є достатньо громіздкою та викладена в іншій роботі, для уникнення повторювань, в даній статті наводити її не будемо. Наведемо лише основні результати, отримані згідно із концепцією електрогеометричної моделі (рис. 1).

Встановлено, що для даної конструкції лінії, біля її опор повне екранування (або іншими словами повний блискавкозахист) досягається при струмі блискавки 10,02 кА. Це означає, що починаючи із цього значення, удари блискавки будуть влучати або безпосередньо в екрануючий (грозозахисний) трос, або у землю поблизу лінії. На рис. 1 наведено візуалізацію того, як змінюється ширина зони відмови блискавкозахисту D при зміні від мінімального до максимального струму блискавки з рівняння (1).

Зокрема, на рис. 1: ширина зони відмови блискавкозахисту $D_1 = 3,38$ м (з одної сторони лінії) відповідає струму блискавки $I_{min} = 3,0$ кА; $D_2 = 0$ м (тобто повне екранування від прямого удару блискавки) відповідає струму блискавки $I_{max} = 10,02$ кА.

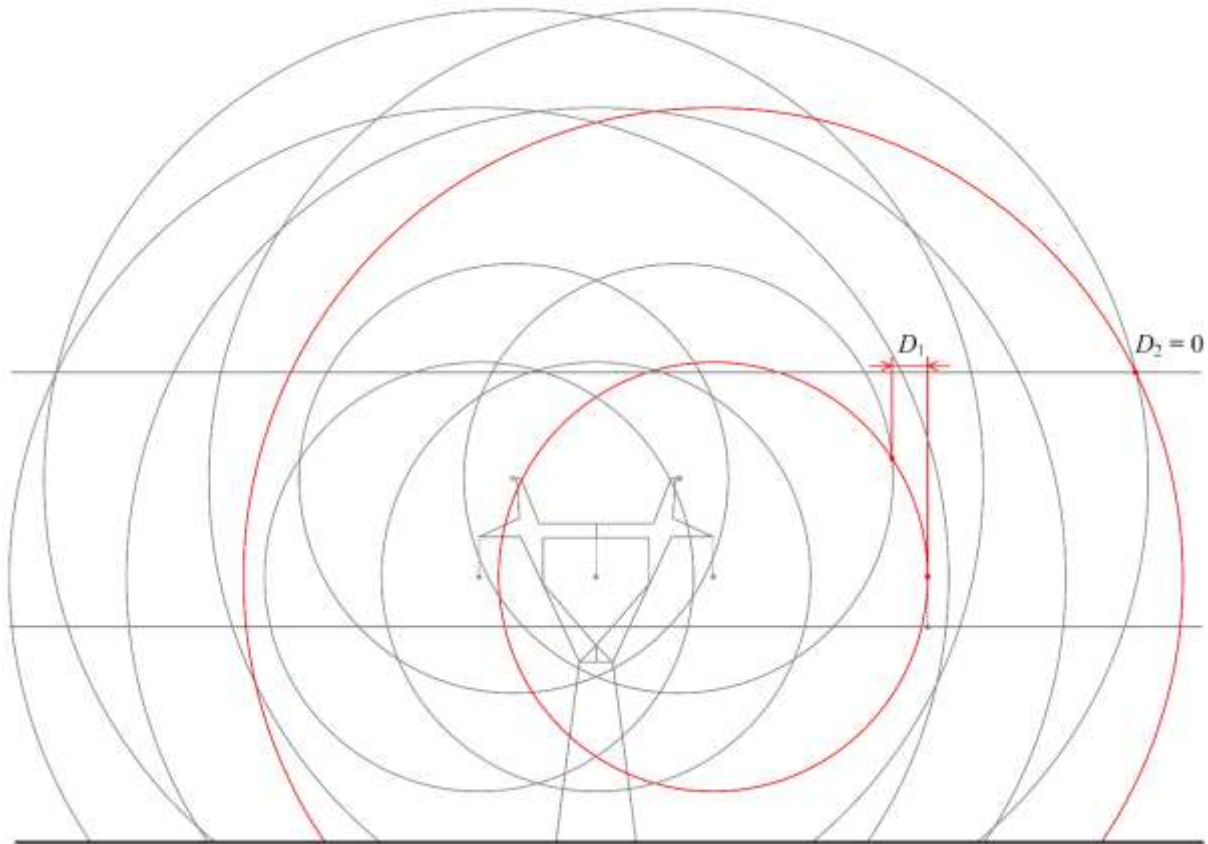


Рисунок 1 – Визначення ширини зони відмови блискавкозахисту безпосередньо біля опори лінії електропередавання за допомогою електрогеометричної моделі

Для обчислення інтегралу в формулі (1) залежність $D(I)$ була розрахована в окремих точках на інтервалі від 3,0 кА до 10,02 кА, а потім апроксимована поліномом 3-го ступеня згідно із методикою, наведеною в [7]:

$$D(I) = D_3(I) = 8,872 \times 10^{-3} \cdot I^3 - 0,266 \cdot I^2 + 1,748 \cdot I + 0,276. \quad (4)$$

Фактично, діапазон зміни добутку двох функцій (3) й (4) під знаком інтегралу в (1) дорівнює діапазону зміни функції $D(I)$. Як вже було сказано раніше, цей діапазон має свої межі. Мінімальне значення цього діапазону може бути прийнято рівним 3,0 кА для всіх типів опор ліній, тому, що за результатами багатолітніх вимірювань струмів блискавки на дослідницьких вежах та опорах ліній не спостерігалось струмів першого зворотного удару блискавки менше цього значення. Максимальне значення цього діапазону дорівнює значенню струму блискавки, при якому буде досягнуто повного екранування від прямого удару блискавки. Це значення для кожного типу опор ліній електропередавання буде різним. Поза межами цього інтервалу функція $D(I)$ дорівнює нулю, а отже і весь підінтегральний вираз у формулі (1) також дорівнює нулю. Графік цієї залежності наведено на рис. 2.

Очікуваний інтервал часу між відмовами (Mean Time Between Failures в англійській мовній науковій літературі) буде обернено пропорційним частоті відмов блискавкозахисту [7]:

$$MTBF = \frac{1}{SFR}. \quad (5)$$

Прийнявши базове значення $N_g = 1,0$ спалахів/(км²×рік), згідно із формулою (1) отримаємо, що $SFR = 0,01155$ спалахів/рік на 100 км довжини лінії. Тоді, за формулою (5) можна очікувати, що хоча б одна відмова блискавкозахисту відбудеться за $MTBF = 86,58$ років. Приймаючи $N_g = 4,5$ спалахів/(км²×рік), що відповідає усередненому значенню, наприклад, для України та Японії станом на січень 2025 року згідно [12], отримаємо, відповідно, $SFR = 0,0520$ спалахів/рік на 100 км довжини лінії, а $MTBF = 19,24$ років.

Далі лінгвістичну модель впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування було синтезовано на основі

системи нечіткого логічного висновку FIS за алгоритмом Мамдані (рис. 3) в програмному додатку Fuzzy Logic Designer програмного середовища MATLAB®, згідно із методикою [13].

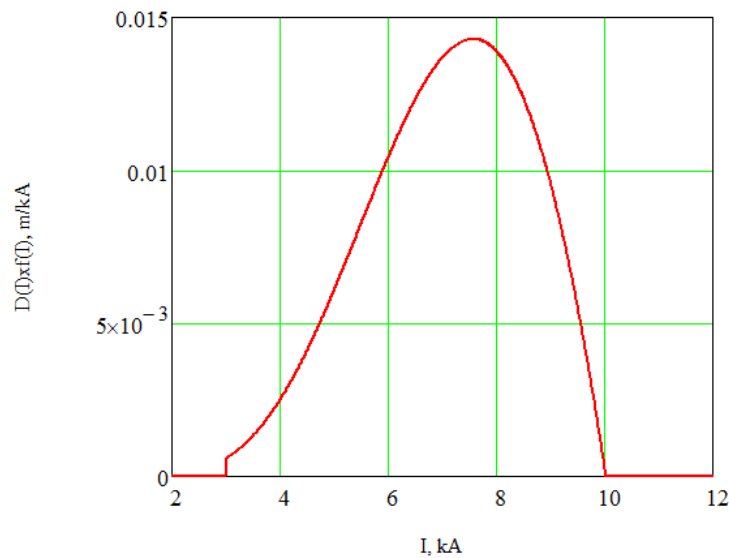


Рисунок 2 – Графік підінтегрального виразу в формулі (1)

PROPERTY EDITOR: FIS	
Type:	Mamdani Type-1
Name	Trots9_f
And method	min
Or method	max
Implication method	min
Aggregation method	max
Defuzzification method	centroid

Рисунок 3 – Характеристика параметрів алгоритму Мамдані

Модель впливу струму блискавки I на частоту відмов екранування SFR синтезовано природною мовою за моделлю, наведеною на рис. 4.

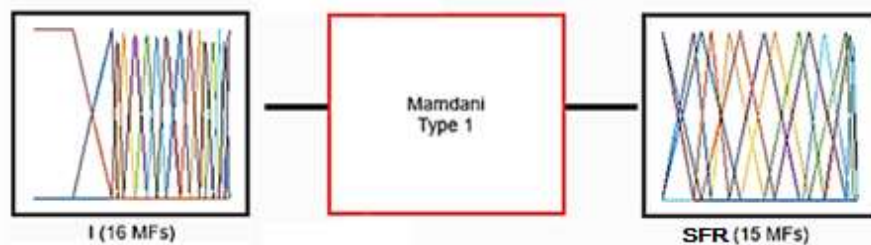


Рисунок 4 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу струму блискавки на частоту відмов екранування за алгоритмом Мамдані

Лінгвістична змінна «струм – I » представлена терм-множиною шістнадцяти нечітких змінних « I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , ..., I_{14} , I_{15} ». З них « I_0 » представлена Z-подібною функцією належності (MFs), а « I_{15} » – S-подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної «струм» в межах від 0 до 10 кА (у відносних одиницях від 0 до 1).

Вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування – SFR » представлена терм-множиною п'ятнадцяти нечітких змінних « Z , GZ , GVL , GL , GA , GAA , GH , GVH , RVH , RH , RVA , RA , RL , RZ , ZE ». З них « Z » представлена Z -подібною функцією належності (MFs), а « ZE » – S -подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної « SFR » в межах від 0 до 0,01155 (у відносних одиницях від 0 до 1).

Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок струму блискавки I з частотою відмов екранування SFR наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Лінгвістичні правила вхідної змінної «струм» з ваговими коефіцієнтами «weight»

Rule	Weight
If I is $I1$ then SFR is GZ	1
If I is $I2$ then SFR is GVL	1
If I is $I3$ then SFR is GL	1
If I is $I5$ then SFR is GAA	1
If I is $I6$ then SFR is GH	1
If I is $I4$ then SFR is GA	1
If I is $I7$ then SFR is GVH	1
If I is $I8$ then SFR is GVH	0.4
If I is $I8$ then SFR is RVH	0.6
If I is $I9$ then SFR is RVH	1
If I is $I10$ then SFR is RH	1
If I is $I11$ then SFR is RVA	1
If I is $I12$ then SFR is RA	1
If I is $I13$ then SFR is RL	1
If I is $I14$ then SFR is RZ	1
If I is $I0$ then SFR is Z	1
If I is $I15$ then SFR is ZE	1

На рис. 5 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок струму блискавки I та частоту відмов екранування SFR .

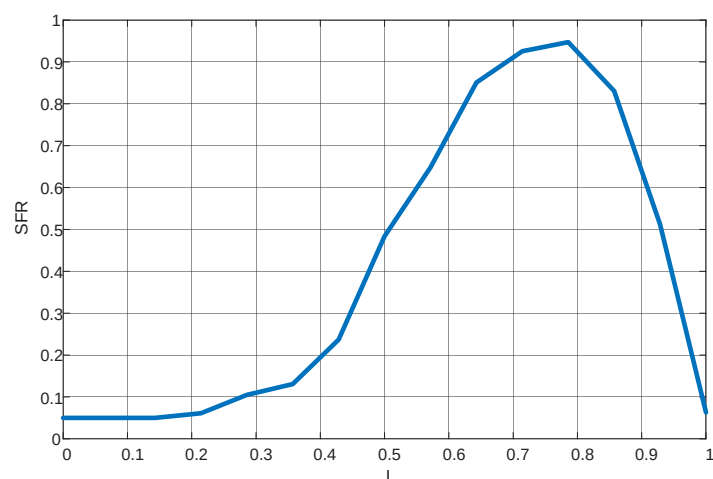


Рисунок 5 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування SFR від струму блискавки I

Модель впливу щільності ймовірності струму блискавки f на частоту відмов екранування SFR синтезовано природною мовою за моделлю наведеною на рис. 6.

Лінгвістична змінна «функція щільності ймовірності струму блискавки – f » представлена терм-множиною з п'яти нечітких змінних « Z , AZ , L , VL , A ». З них « Z » представлена Z -подібною функцією належності (MFs), а « A » – S -подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені

трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної « f » в межах від 0 до 0,027 (у відносних одиницях від 0 до 1).

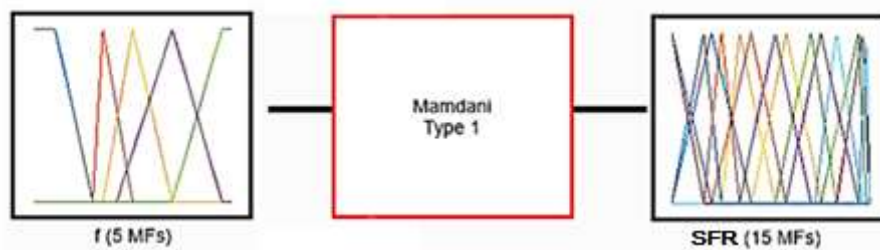


Рисунок 6 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу ймовірності струму блискавки на частоту відмов екранування

Вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування – SFR » представлена терм-множиною з п'ятнадцяти нечітких змінних, аналогічно попередній моделі (рис. 4).

Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок щільності ймовірності струму блискавки f з частотою відмов екранування SFR наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Лінгвістичні правила вхідної змінної « f » з ваговими коефіцієнтами «weight»

Rule	Weight
If f is L then SFR is GL	0.8
If f is AZ then SFR is Z	1
If f is Z then SFR is Z	1
If f is L then SFR is GA	1
If f is L then SFR is GVL	1
If f is VL then SFR is GVH	1
If f is VL then SFR is RA	1
If f is A then SFR is ZE	0.8
If f is VL then SFR is RZ	0.2
If f is A then SFR is RZ	0.8
If f is VL then SFR is RVA	1

На рис. 7 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок функції щільності ймовірності струму блискавки f з частотою відмов екранування SFR .

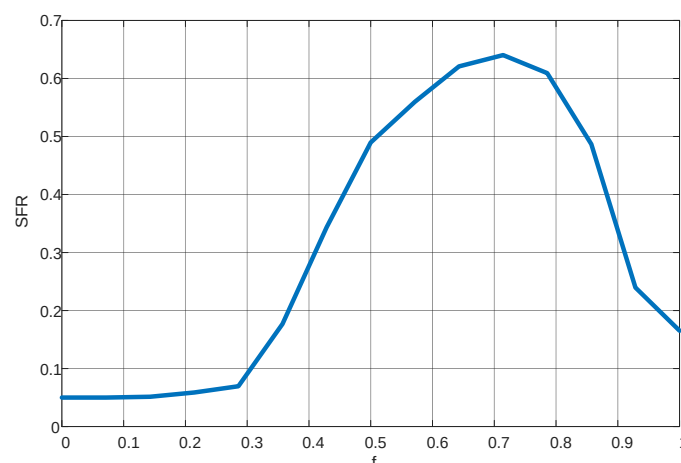


Рисунок 7 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування SFR від функції щільності ймовірності струму блискавки f

Модель впливу ширини зони відмови блискавкозахисту D на частоту відмов екранування SFR синтезовано за моделлю наведеною на рис. 8.

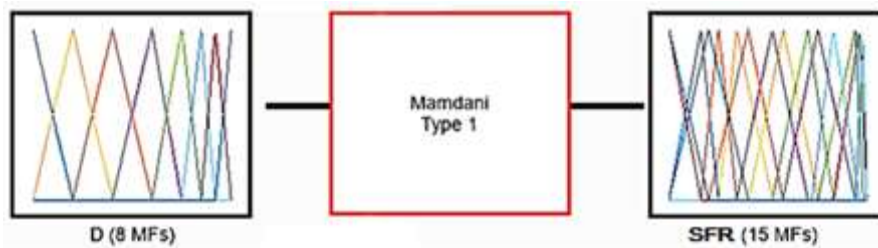


Рисунок 8 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу ширини зони відмови блискавкозахисту на частоту відмов екранування

В наведеній моделі вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування – SFR » представлена терм-множиною з п'ятнадцяти нечітких змінних, аналогічно попередніх моделей (рис. 4, рис. 6).

Лінгвістична змінна «ширина зони відмови блискавкозахисту – D » представлена терм-множиною з восьми нечітких змінних « Z , S , VS , A , VA , H , VH , AVH ». З них « Z » представлена Z -подібною функцією належності, а « AVH » – S -подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної « D » в межах від 0 до 7 метрів (у відносних одиницях від 0 до 1). Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок ширини зони відмови блискавкозахисту D з частотою відмов екранування SFR наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Лінгвістичні правила вхідної змінної « D »

Rule	Weight
If D is Z then SFR is ZE	1
If D is S then SFR is RA	1
If D is VS then SFR is RH	1
If D is VS then SFR is RVA	0.2
If D is A then SFR is RH	0.5
If D is A then SFR is RVH	1
If D is H then SFR is GH	1
If D is H then SFR is GAA	1
If D is VH then SFR is GL	0.5
If D is VH then SFR is GV	1
If D is AVH then SFR is Z	1
If D is VH then SFR is Z	1
If D is VA then SFR is GH	1

На рис. 9 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок ширини зони відмови блискавкозахисту D з частотою відмов екранування SFR .

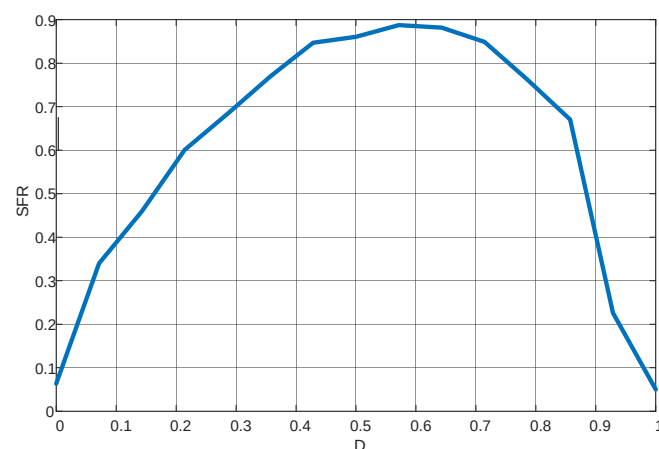


Рисунок 9 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування SFR від ширини зони відмови блискавкозахисту D

Висновки. На основі використання математичного апарату нечіткої логіки створено лінгвістичні моделі, які параметрично відтворюють передатні характеристики впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування *SFR* ліній електропередавання у всьому діапазоні змін цих параметрів.

Синтезовані передатні характеристики для ліній електропередавання напругою 330 кВ можливо використовувати в імітаційних моделях дослідження систем блискавкозахисту високовольтних ліній електропередавання різних рівнів напруги, використовуючи при цьому коефіцієнти масштабування.

Це дає можливість покращити точність прогнозування відмов екранування на основі змінних зовнішніх факторів, таких як інтенсивність блискавки та технічний стан ізоляції. Оскільки ці моделі враховують комплексну взаємодію різних параметрів, вони можуть бути ефективним інструментом для розробки більш надійних і гнучких систем блискавкозахисту в рамках сучасних концепцій Smart Grid.

Список використаної літератури

1. Dai S., Jianben L., Huang L., Liu Z., Xiao Q., Liu G. Shielding failure trip-out rate algorithm based on improved EGM transmission line. 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China. 2019. P. 319-323, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886256.
2. Tong C., Cai Y., Zhang Z., Wang Q., Gao Y., Li J., Wei B., Yu D. Artificial intelligence-based lightning protection of smart grid distribution system. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil. 2017. P. 279-286, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116937.
3. Троценко С. О., Архипов Я. А. Розумні мережі та захист повітряних ліній електропередачі від блискавки. Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 22–24 травня 2024 року, 2024, С. 139-140, doi: 10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024.
4. Utomo B. T., Nappu M. B., Said S. M., Arief A. The placement of the transmission lightning arrester (TLA) at 150 kV network using fuzzy logic. 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, Indonesia. 2018. P. 347-352, doi: 10.1109/ICITEE.2018.8534899.
5. Hafeez K., Khan S. Risk management analysis with the help of lightning strike mapping around 500 k-v grid station using artificial intelligence technique. 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence, Rawalpindi, Pakistan. 2012. P. 165-168, doi: 10.1109/ICRAI.2012.6413384.
6. Hamel T., Bedoui S., Bayadi A. Impact of transmission line lightning performance on an operational substation reliability considering the lightning stroke incidence angle. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 1. P. 56-64, doi: 10.20998/2074-272X.2025.1.08.
7. Trotsenko Y., Arkhypov Y. On application of polynomial functions in assessment of lightning shielding performance of overhead transmission lines. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2024. Issue 4(147). P. 186-193, doi: 10.32782/1995-0519.2024.4.24.
8. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines. 1997. P. 1-44, doi: 10.1109/IEEESTD.1997.84660.
9. Takami J., Okabe S. Observational results of lightning current on transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No. 1. P. 547-556, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883006.
10. Berger K. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*. 1967. Vol. 283. No. 6. P. 478-525, doi: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
11. Häusler M., Schlayer G., Fitterer G. Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings. *ABB review*. 1997. No. 3. P. 4-11.
12. Vaisala Xweather Interactive Lightning Density Map. URL: <https://interactive-lightning-map.vaisala.com> (дата звернення: 05.01.2025).
13. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В. В. Кирик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2019. – 224 с., ISBN 978-966-622-969-7.

Y. Trotsenko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-9379-0061

V.V. Kyryk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-0419-8934

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

SYNTHESIS OF LINGUISTIC MODELS FOR REPLICATING THE IMPACT OF LIGHTNING ON THE SHIELDING FAILURE RATE OF AN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE

Background. Traditional methods for calculating lightning protection systems are continuously improving based on new knowledge about lightning and its characteristics. Growing demands for protection efficiency, especially for power transmission lines in the Smart Grid concept, create a need for new approaches. Fuzzy logic serves as one way to address these challenges, as it allows modeling complex and uncertain processes, which are

typical for lightning protection systems. **Objective.** The main goal is to develop a linguistic model for predicting the failure frequency of shielding based on lightning current parameters, the width of the failure zone, and the current probability density function. Simulation helps calculate failure frequencies that could lead to insulation flashovers and equipment damage. **Methods.** An electrogeometric model was used to determine the width of the shielding failure zone. The synthesis of linguistic models for replicating the effect of lightning on the shielding failure rate was performed using a mathematical apparatus of fuzzy logic. The shielding failure rate is considered, which determines the probability that lightning will strike the phase conductor, bypassing the overhead shield wire. It is assumed that the minimum current for calculations is 3.0 kA, which is the threshold below which no initial lightning strikes have been observed on real power transmission lines. The probability of such a lightning current is calculated to be only 0.23%. For modeling the lightning current probability density function, formulas similar to the results of measurements on research towers were used. **Results.** A data about the width of the lightning shielding failure zone on a typical 330 kV power transmission line tower is obtained, demonstrating how this zone changes with different prospective lightning current values. **Conclusions.** Simulating the failure frequency of shielding using fuzzy logic and the Mamdani algorithm allows for more accurate failure predictions, taking into account variable conditions. Structural diagrams and transfer functions demonstrate how different parameters, such as current, current density, and failure zone width, affect the failure frequency. All these parameters and their interrelationships are described using linguistic variables and fuzzy rules, enabling more effective predictions for lightning protection systems. This approach provides more accurate and flexible modeling, meeting modern requirements for the safety of overhead power transmission lines, especially within the Smart Grid concept.

Keywords: lightning, electrogeometric model, shielding failure rate, overhead power line, linguistic models, fuzzy logic, smart grids, failure prediction.

References

1. Dai, S., Jianben, L., Huang, L., Liu, Z., Xiao Q., & Liu, G. (2019). Shielding failure trip-out rate algorithm based on improved EGM transmission line. 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China, pp. 319-323, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886256.
2. Tong, C., Cai, Y., Zhang, Z., Wang, Q., Gao, Y., Li, J., Wei, B., & Yu, D. (2017). Artificial intelligence-based lightning protection of smart grid distribution system. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, pp. 279-286, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116937.
3. Trotsenko, Y., & Arkhypov, Y. (2024). Smart grids and lightning protection of overhead power lines. XXV International Scientific and Practical Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century", Ukraine, Kyiv, May 22-24, pp. 139-140, doi: 10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024.
4. Utomo, B. T., Nappu, M. B., Said, S. M., & Arief, A. (2018). The placement of the transmission lightning arrester (TLA) at 150 kV network using fuzzy logic. 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, Indonesia, pp. 347-352, doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534899.
5. Hafeez, K., & Khan, S. (2012). Risk management analysis with the help of lightning strike mapping around 500 k-v grid station using artificial intelligence technique. 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence, Rawalpindi, Pakistan, pp. 165-168, doi: 10.1109/ICRAI.2012.6413384.
6. Hamel, T., Bedoui, S., & Bayadi, A. (2025). Impact of transmission line lightning performance on an operational substation reliability considering the lightning stroke incidence angle. *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 56-64, doi: 10.20998/2074-272X.2025.1.08.
7. Trotsenko, Y., & Arkhypov, Y. (2024). On application of polynomial functions in assessment of lightning shielding performance of overhead transmission lines. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, Issue 4(147), pp. 186-193, doi: 10.32782/1995-0519.2024.4.24.
8. IEEE Std 1243-1997. (1997). IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, pp. 1-44, doi: 10.1109/IEEESTD.1997.84660.
9. Takami, J., & Okabe, S. (2007). Observational results of lightning current on transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 547-556, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883006.
10. Berger, K. (1967). Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*, vol. 283, no. 6, pp. 478-525, doi: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
11. Häusler, M., Schlayer, G., & Fitterer, G. (1997). Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings. *ABB review*, no. 3, pp. 4-11.
12. Vaisala Xweather Interactive Global Lightning Density Map. URL: <https://interactive-lightning-map.vaisala.com> (January 05, 2025).
13. Kyryk, V. V. (2019). *Mathematical Apparatus of Artificial Intelligence in Electric Power Systems: Textbook [Matematychnyy aparat shchuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk]*. Kyiv. Igor Sikorsky KPI: Politehnika. – 224 P. ISBN 978-966-622-969-7.

Надійшла: 17.01.2025

Received: 17.01.2025