

НЕЧІТКА ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ДОСТОВІРНОСТІ ЧАСТОТИ ВІДМОВ ЕКРАНУВАННЯ ВІД РОЗРЯДІВ БЛИСКАВКИ У ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ, ПРИЗНАЧЕНІ ДЛЯ ПРИЄДНАННЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДО ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Отримано 26 лист. 2025 р.; рекомендовано до публікації 23 бер. 2026 р.
Доступно онлайн 31 бер. 2026 р.

Кирик В. В.¹, Троценко Є. О.²

Автор для кореспонденції: Троценко Євгеній,
e-mail: trotsenko2014@gmail.com

¹ д-р. техн. наук, професор
<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

² канд. техн. наук, доцент
<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

Анотація. Розроблено лінгвістичну модель на основі нечіткої логіки для оцінки достовірності частоти відмов екранування блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання, що підключають вітрові електростанції до енергомережі. Модель інтегрує ключові параметри, зокрема щільність імовірності струму блискавки та ширину зони відмови екранування від блискавки, щоб відобразити їх спільний вплив на вразливість лінії. Вхідні та вихідні змінні представлені нечіткими терм-множинами з визначеними функціями належності, а скорочена база правил синтезує взаємозв'язки між змінними. Імітаційне моделювання лінії напругою 330 кВ демонструє поверхню відгуку та інтенсивність розподілу достовірності відмов екранування, що дає змогу оперативно оцінювати частоту відмов без аналітичної формалізації. Підхід можна адаптувати для високовольтних ліній різних класів, регулюючи коефіцієнти масштабування, що забезпечує практичний інструмент для проектування та оцінки систем блискавкозахисту при інтеграції вітрової енергетики.

^{1, 2} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Ключові слова: нечітка логіка, високовольтні лінії електропередавання, струм блискавки, блискавкозахист, частота відмов екранування, імітаційне моделювання, вітрові електростанції, інтеграція об'єктів вітрової енергетики.

Перелік використаних позначень та скорочень

EGM – (Electro-Geometric Model) електрогеометрична модель
HVAC – (High Voltage Alternating Current) змінний струм високої напруги
HVDC – (High Voltage Direct Current) постійний струм високої напруги
WPP – (Wind Power Plant) вітрова електростанція

Вступ. Зі зростанням внеску вітрової енергетики в загальний енергетичний баланс та встановленням великої кількості вітрових турбін ризик ударів блискавки в ці споруди став суттєвою проблемою [1, 2]. Через висоту вітроенергетичних установок та розташування на вершинах пагорбів або у відкритих місцевостях імовірність прямих ударів блискавки в них значно вища, ніж в об'єкти традиційної енергетики. Згідно зі звітом [3] лише у 2023 році в Сполучених Штатах було зафіксовано понад 77 000 ударів блискавки у вітрові турбіни, при цьому дві вітрові електростанції зазнали понад 1 000 ударів кожна. Однак проблема є значно ширшою, оскільки блискавка становить небезпеку не лише для самих вітрових турбін, а й для навколишньої інфраструктури та систем.

Можна стверджувати, що останніми роками питання блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання, які безпосередньо забезпечують інтеграцію вітрових електростанцій (ВЕС) до електромережі, перетворилися на окрему область досліджень у межах ширшої галузі захисту від блискавки [4, 5]. Зі зростанням кількості та масштабів вітроенергетичних установок, які часто

розміщуються у віддалених, підвищених та схильних до грозової активності районах, лінії електропередавання, що з'єднують їх з національними мережами, стикаються з унікальними викликами, нехарактерними для традиційної інфраструктури. Серед цих викликів – вплив суворих природних умов, як-от сильний вітер і обледеніння; підвищена вразливість до прямих ударів блискавки; складні умови заземлення; а також специфічні особливості захисту від блискавки підстанцій вітрових електростанцій, конструкція яких відрізняється від традиційних електричних підстанцій [6, 7]. Як наслідок, виникає потреба у спеціалізованих підходах, зокрема в індивідуально підібраному захисті від імпульсних перенапруг, оптимізованих системах заземлення, удосконаленому блискавкозахисті повітряних ліній електропередавання та застосуванні високоефективних розрядників на лініях. Зростання складності та критичної важливості надійної інтеграції відновлюваних джерел енергії в мережі передачі обґрунтовує виділення блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання, що підключені до підстанцій вітрових електростанцій, в окрему піддисципліну. Ця нова галузь тісно пов'язана з уже сформовани-

ми напрямами, такими як блискавкозахист повітряних ліній у системах змінного струму високої напруги (HVAC), постійного струму високої напруги (HVDC), а також ліній електропередавання, прокладених у гірській місцевості. Традиційні методи розрахунку ризику відмови блискавкозахисту постійно вдосконалюються завдяки поглибленому розумінню природи блискавки та її характеристик. Зростаючий попит на вищу ефективність захисту, особливо для критичної інфраструктури, такої як повітряні лінії електропередавання, підключені до великих вітрових електростанцій, виявив обмеження традиційних підходів і підкреслив необхідність впровадження інноваційних рішень. Останні дослідження свідчать, що нечітка логіка є перспективним рішенням цих проблем [8, 9], оскільки вона дає змогу моделювати складні та невизначені явища, притаманні системам блискавкозахисту. Завдяки здатності враховувати неоднозначність і варіативність ключових параметрів нечітка логіка підвищує надійність оцінки ризиків і сприяє розробці стійкіших систем.

Донедавна для підключення вітрових електростанцій або вітрових ферм до електромережі переважно використовувалися повітряні лінії електропередавання з рівнем напруги до 220 кВ [4, 10]. Проте постійне зростання номінальної потужності вітрових турбін і, відповідно, їх розмірів сприяло збільшенню вироблення електроенергії вітровими парками, що своєю чергою зумовило потребу у використанні інфраструктури передачі з вищим рівнем напруги. Як наслідок, дедалі ширше впроваджуються повітряні лінії 330 кВ для підключення великомасштабних вітропарків до мережі, що демонструється, зокрема, проектом повітряної лінії 330 кВ для вітрової електростанції Рай-Парк [11]. Лінії електропередавання з вищим рівнем напруги зазвичай встановлюються на вищих опорах, які є вразливішими до прямих ударів блискавки. Відповідно, точна оцінка очікуваної кількості відмов блискавкозахисту, зокрема відмови екранування, на лініях 330 кВ стає критично важливою не лише в області електричних мереж, а й у ширшому контексті інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпечення надійності інфраструктури.

В Україні вітрова енергетика залишається важливою складовою відновлюваної генерації, і, незважаючи на війну, вона активно розвивається: за оцінками галузевих асоціацій упродовж 2026 року очікується будівництво та введення в експлуатацію вітрових електростанцій загальною потужністю близько 500–600 МВт, що є значним зростанням порівняно з попередніми роками та свідчить про стійкий інтерес інвесторів до цього сегменту енергетики [12]. При цьому асоціації відновлюваної енергетики спільно з оператором системи передачі працюють над усуненням ключових бар'єрів, пов'язаних з підключенням нових потужностей до електромереж, що безпосередньо впливає на надійність передачі електроенергії від вітростанцій до споживачів і створює додаткові вимоги до систем блискавкозахисту повітряних ліній.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є розробка нечіткої логічної моделі для оцінювання досто-

вірності частоти відмов екранування від розрядів блискавки у повітряні лінії електропередавання, призначені для приєднання вітрових електростанцій до енергосистеми. Необхідність такого підходу зумовлена невизначеністю параметрів струму блискавки, варіативністю умов грозової діяльності та обмеженістю статистичних даних щодо відмов системи екранування.

Запропонована модель на основі математичного апарату нечіткої логіки дає змогу формалізувати експертні знання та врахувати нечіткість вхідних параметрів, зокрема функцію щільності ймовірності струму блискавки та просторову ширину зони відмови екранування в інтервалі між мінімальним і максимальним значеннями струму, за яких забезпечується або порушується повне екранування лінії. Це допоможе підвищити обґрунтованість оцінювання частоти відмов екранування та надійності функціонування ліній електропередавання, що забезпечують видачу потужності вітрових електростанцій.

Виклад основного матеріалу. Прямий удар блискавки у фазний провідник повітряної лінії електропередавання, що веде до вітрової електростанції, може мати кілька критичних наслідків, які впливають як на інфраструктуру передачі, так і на підключений об'єкт відновлюваної генерації. Висока амплітуда та крутий фронт струму блискавки можуть спричинити перенапругу, яка перевищує електричну міцність ізоляції елементів лінії, що потенційно призводить до електричних пробів на заземлені конструкції, такі як опори або траверси. Це може викликати короткі замикання між фазами або між фазою та землею, що спричинить відключення відповідної ділянки лінії, а отже, тимчасове або тривале припинення передавання електроенергії з вітрової електростанції до мережі.

Повторні аварії, спричинені блискавкою, можуть призвести до деградації ізоляції, пошкодити обладнання лінії або порушити працездатність пристроїв захисту від перенапруги. Крім того, електромагнітні завади, що виникають внаслідок удару блискавки, можуть впливати на роботу прилеглих систем керування й зв'язку, що ще більше ускладнює відновлення роботи системи та підтримання її стабільності. Оскільки вітрові електростанції часто розташовують у відкритій місцевості або на підвищеннях зі збільшеним ризиком ураження блискавкою, ризики та наслідки таких подій є особливо суттєвими, що вимагає надійного блискавкозахисту та ефективних стратегій зниження аварійних відключень.

Відмова або недостатня ефективність системи блискавкозахисту на повітряній лінії, що з'єднує підстанцію вітрової електростанції з електричною мережею, безпосередньо впливає на режим роботи всього вітрового парку. У такому разі для самого вітрового парку це може означати вимушене припинення видачі електричної потужності в мережу, спрацювання систем захисту та автоматичне відключення вітрових турбін. Можливі зупинки окремих або всіх генераторів, перехід обладнання в аварійний режим та необхідність перезапуску після усунення пошкоджень. Це призводить до втрати виробітку

електроенергії, недоотримання доходу від продажу електроенергії та зниження коефіцієнта використання встановленої потужності вітрового парку.

Повітряні лінії електропередавання зазвичай обладнані грозозахисними (або екрануючими) тросами, призначеними для захисту фазних проводів від прямих ударів блискавки. Однак якщо прямий удар блискавки у фазний провідник відбувається попри наявність захисних тросів, таке явище називається відмовою блискавкозахисту. Це

явище можна графічно проілюструвати за допомогою електрогеометричної моделі (EGM) прямого удару блискавки в повітряну лінію. Відповідно до концепції електрогеометричної моделі, це пояснюється тим, що за певних значень струму блискавки існує зона поблизу фазного проводника, в межах якої грозозахисний трос не виконує свою захисну функцію. Блискавка, яка поширюється з грозової хмари й потрапляє в цю зону, призводить до прямого удару у фазний провідник (рис. 1).

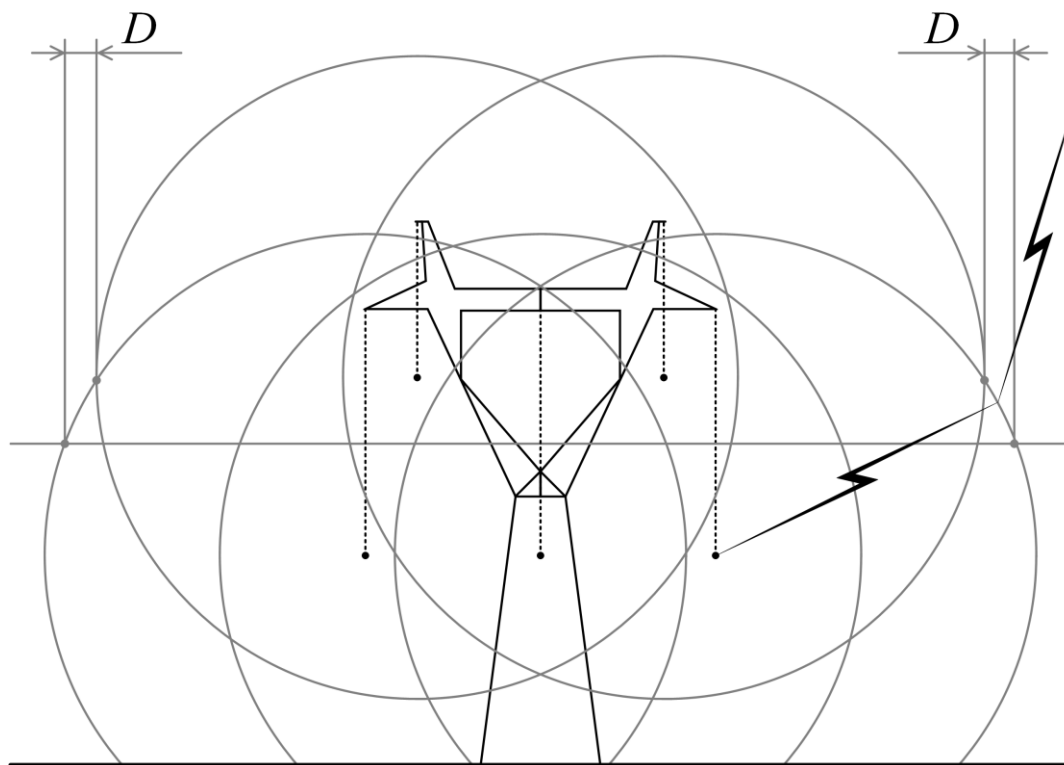


Рис. 1. Графічне зображення відмови екранування від блискавки на основі електро-геометричної моделі

На рис. 1: D – це зона ураження блискавкою, в межах якої блискавкозахисні троси не захищають фазні проводи. Графічні побудови на рис. 1 виконані з використанням креслення реально існуючої опори повітряної лінії електропередавання 330 кВ, опублікованого в науковому журналі з відкритим доступом [13], для струму блискавки величиною 3 кА.

Електрогеометрична модель передусім дає змогу визначити розміри та просторове положення зони ураження блискавкою поблизу провідника. Водночас вона дає уявлення про можливу траєкторію розряду блискавки під час прямого удару в провідник. Один з таких прикладів наведено вище на рис. 1. На фотографіях, де зафіксовані удари блискавки у фазні проводи, траєкторія розряду має подібну поведінку: блискавка спочатку поширюється вертикально вниз, а потім згинається та влучає у фазний провід майже горизонтально – з боку від повітряної лінії [14], що ілюструє ефект екранування з боку грозозахисних тросів.

Ефективність блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання зазвичай оцінюється за допомогою

показника частоти відмов екранування (англ. – Shielding Failure Rate, SFR). Цей параметр відображає очікувану кількість спалахів блискавки, які можуть оминати грозозахисний (екрануючий) трос і влучити у фазний провідник у межах певного проміжку часу. Зазвичай він виражається як кількість таких спалахів на 100 км лінії електропередавання на рік. Така подія може супроводжуватися електричним пробоем від провідника до заземленої траверси, хоча це відбувається не завжди. Для повітряної лінії електропередавання з горизонтальним розташуванням фаз, що є геометрично симетричним відносно середньої фази, цей параметр обчислюється за такою формулою [15]:

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

де: SFR – частота відмов екранування повітряної лінії електропередавання, удари/рік; N_g – щільність спалахів блискавки між хмарою та землею в районі проходження лінії, удари/(км²·рік); L – довжина повітряної лінії електропередавання, підключеної до підстанції

вітрової електростанції, км; $D(I)$ – зона ураження блискавкою, що відповідає відмові екранування, м; $f(I)$ – функція щільності ймовірності струму першого зворотного розряду, $1/\text{кА}$; I – пікове значення потенційного струму блискавки, кА; $I_{\min}$ – нижнє порогове значення струму блискавки, яке зазвичай приймається рівним не менше ніж 3 кА; $I_{\max}$ – верхнє порогове значення струму блискавки, за якого досягається повне екранування, кА. Останній параметр залежить від конструктивних особливостей опори повітряної лінії електропередавання і є унікальним для кожного конкретного типу лінії. Умова повного екранування означає, що, починаючи з певного значення струму блискавки, прямий удар у фазний провідник стає неможливим, і блискавка може вразити лише грозозахисний трос або землю поблизу лінії.

Достовірність частоти відмов екранування для повітряної лінії електропередавання може бути лінгвістично представлена функцією моделі нечіткої логіки (англ. – Fuzzy Logic Model, FLM), яка задається таким виразом.

$$M(SFR) = f_{FLM} \left(\int_{I_{\min}}^{I_{\max}} D(I) \cdot f(I) \cdot dI \right). \quad (2)$$

У цьому разі, враховуючи формули (1) та (2), інтенсивність відмов екранування можна записати як:

$$SFR = 2 \times 10^{-3} \cdot N_g \cdot L \cdot M(SFR). \quad (3)$$

Моделі нечіткої логіки (рис. 2) достовірності частоти відмов екранування для повітряної лінії електропередавання напругою 330 кВ була розроблена за допомогою інструмента Fuzzy Logic Designer у середовищі MATLAB®. Моделі, реалізована відповідно до алгоритму виведення Мамдані, відображає інтегральну залежність між частотою відмов екранування, функцією щільності ймовірності струму блискавки та шириною зони відмови екранування в межах діапазону значень струму блискавки, які відповідають умовам повного екранування.

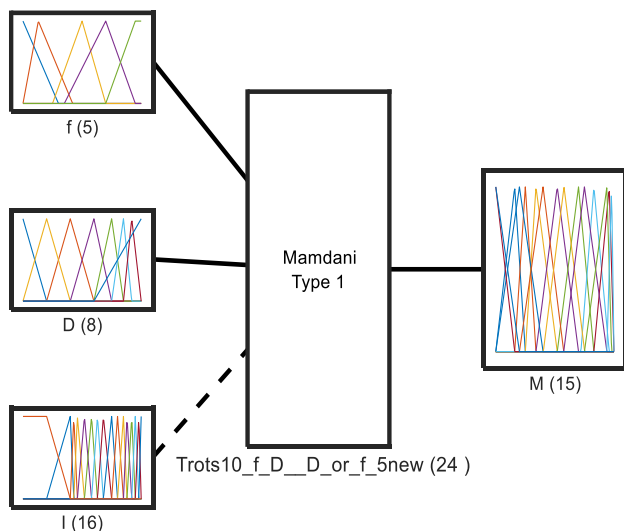


Рис. 2. Нечітка логічна модель функції достовірності частоти відмов екранування повітряних ліній електропередавання

Моделі має такі системні характеристики, які наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Системні характеристики нечіткої логічної моделі функції достовірності частоти відмов екранування повітряних ліній електропередавання

Фрагмент коду в MATLAB®

```
[System]
Name='Trots10_f_D_D_or_f_5new';
Type='mamdani';
Version=2.0;
NumInputs=3;
NumOutputs=1;
NumRules=24;
AndMethod='min';
OrMethod='max';
ImpMethod='min';
AggMethod='max';
DefuzzMethod='centroid'.
```

Згідно з виразом (2) вхідні лінгвістичні змінні визначаються в такий спосіб: щільність ймовірності струму блискавки – терм « f »; ширина зони відмови екранування блискавки – терм « D »; та струм блискавки – терм « I ». Вихідна лінгвістична змінна представлена як коефіцієнт відмов екранування – терм « M ». Згідно зі статистичним моделюванням множина можливих значень лінгвістичної змінної, що представляє щільність ймовірності струму блискавки, f , у заданому діапазоні $\{0...0,0125\}$ в абсолютних одиницях, представлена як нечітка терм-множина $T_f = \{Z, AZ, L, VL, A\}$ з відповідними функціями належності, визначеними на відносному інтервалі $\{0...1\}$. Рис. 3 графічно ілюструє інтервали нечітких множин, описані функціями належності $\mu(Z)$, $\mu(AZ)$, $\mu(L)$, $\mu(VL)$, $\mu(A)$, разом з їх відповідними формами в межах фізичного діапазону значень функції щільності ймовірності струму блискавки. Функції належності дають змогу призначати фізичним значенням лінгвістичної змінної f ступінь належності μ (від 0 до 1) до відповідних нечітких множин, визначених на універсумі висловлювань.

Згідно зі статистичним моделюванням множина можливих значень вхідної лінгвістичної змінної, що представляє ширину зони відмови блискавкозахисту, D , у заданому діапазоні $\{0...6,754\}$ в абсолютних одиницях – метрах, представлена нечіткою терм-множиною $T_D = \{Z, S, VS, A, VA, H, VH, AVH\}$, яка містить вісім відповідних функцій належності, визначених на відносному інтервалі $\{0...1\}$. Рис. 4 графічно ілюструє інтервали нечітких множин, описані їх функціями належності $\mu(Z)$, $\mu(S)$, $\mu(VS)$, $\mu(A)$, $\mu(VA)$, $\mu(H)$, $\mu(VH)$, $\mu(AVH)$, разом з відповідними формами в межах фізичного діапазону ширини зони відмови блискавкозахисту. Функції належності дають змогу призначати фізичним значенням лінгвістичної змінної D ступінь належності μ (від 0 до 1) до відповідних нечітких множин, визначених на універсумі висловлювань.

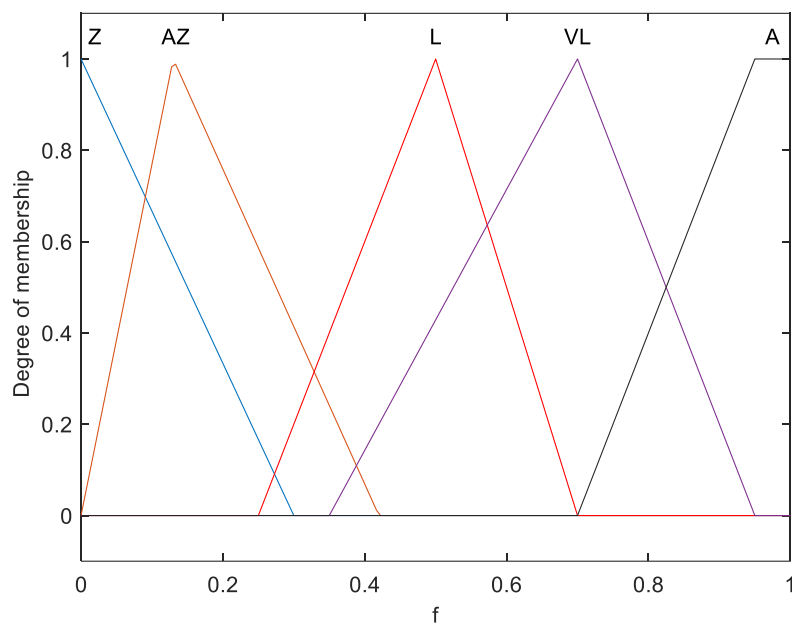


Рис. 3. Функції належності лінгвістичної змінної щільності ймовірності струму блискавки f

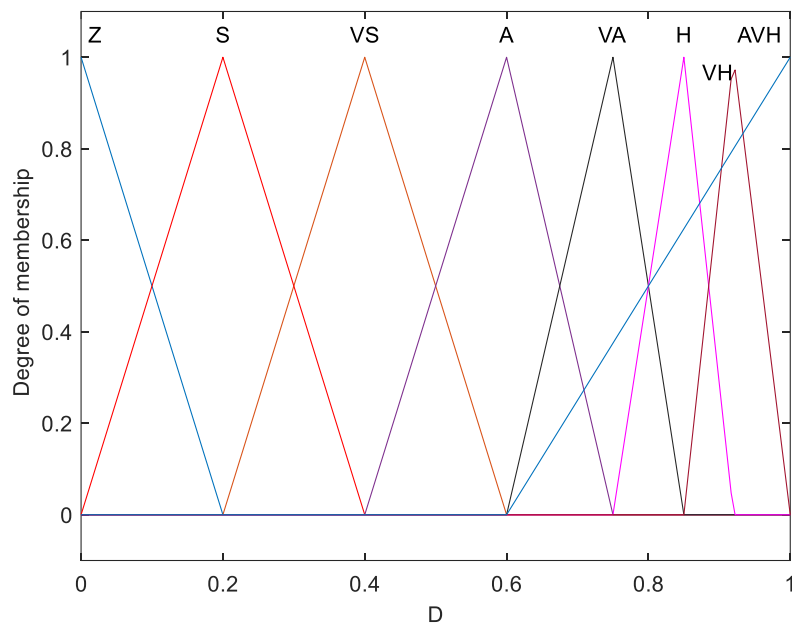
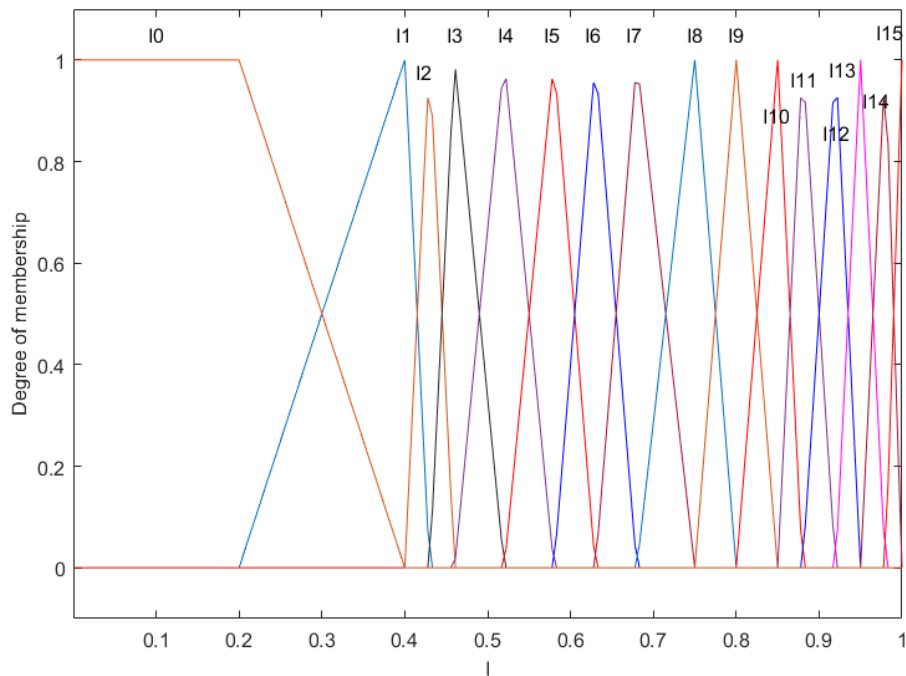
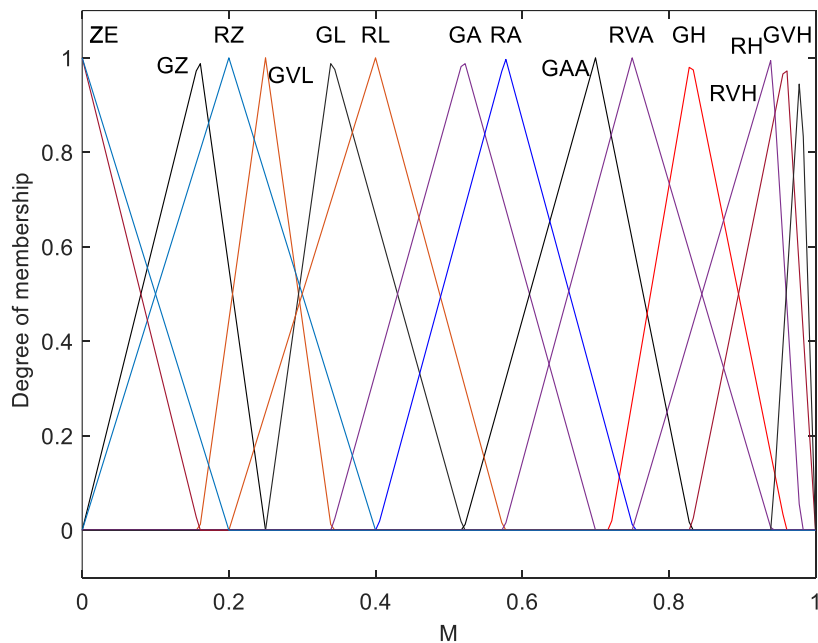


Рис. 4. Функції належності лінгвістичної змінної ширини зони відмови екранування від блискавки D

Третя вхідна лінгвістична змінна – струм блискавки I – у діапазоні від 0 до 10 кА представлена нечіткою термножиною $T_I = \{I_0, I_1, \dots, I_{14}, I_{15}\}$, яка містить шістнадцять функцій належності, визначених на відносному інтервалі $\{0 \dots 1\}$ та розподілених по нечітких множинах на нормалізованій шкалі. Рис. 5 графічно ілюструє інтервали нечітких множин, описані відповідними функціями належності $\mu(I_0), \mu(I_1), \dots, \mu(I_{14}), \mu(I_{15})$, разом з їх формами в межах фізичного діапазону значень струму блискавки. Ці функції належності імпліцитно вбудовані в структуру моделі.

На основі аналітичної оцінки й статистичного моделювання множина можливих значень вихідної лінгвістичної

змінної, що представляє достовірність частоти відмов екранування повітряної лінії електропередавання $M(SFR)$ у заданому діапазоні $\{0 \dots 0,014\}$ в абсолютних одиницях, подана у вигляді нечіткої термножини з п'ятнадцятьма відповідними функціями належності: $T_M = \{Z, GZ, GVL, GL, GA, GAA, GH, GVH, ZE, RZ, RL, RA, RVA, RH, RVH\}$, які визначені на відносному інтервалі $\{0 \dots 1\}$. Рис. 6 графічно ілюструє інтервали нечітких множин, описаних функціями належності $\mu(Z), \mu(GZ), \mu(GVL), \mu(GL), \mu(GA), \mu(GAA), \mu(GH), \mu(GVH), \mu(ZE), \mu(RZ), \mu(RL), \mu(RA), \mu(RVA), \mu(RH), \mu(RVH)$, разом з їх відповідними формами в межах фізичного діапазону значень достовірності частоти відмов екранування повітряної лінії $M(SFR)$.

Рис. 5. Функції належності лінгвістичної змінної струму блискавки I Рис. 6. Функції належності лінгвістичної змінної достовірності частоти відмов екранування M

Функції належності третьої вхідної лінгвістичної змінної – струму блискавки I – не включені до бази правил явно. Натомість вони виконують роль зв'язувальної терм-множини між вхідними лінгвістичними змінними – щільністю ймовірності струму блискавки f та шириною зони відмови блискавкозахисту D , і вихідною лінгвістичною змінною – частотою відмов екранування M , на етапі формування правил моделі. Інакше кажучи, на основі терм-множини функцій належності змінної струм блискавки синтезуються терм-множини вхідних лінгвістичних змінних – щільності ймовірності струму блискав-

ки та ширини зони відмови блискавкозахисту, які логічно пов'язуються з терм-множиною вихідної змінної – частоти відмов екранування:

$$T_I \xrightarrow{T_f, T_D} T_M.$$

Такий підхід істотно спрощує синтез правил і зменшує їх кількість у базі знань моделі. У процесі налаштування моделі базу правил було скорочено з 40 до 24. Структура цих правил наведена нижче, в табл. 2, при цьому функції належності пронумеровані відповідно до їхнього порядку в межах відповідних терм-множин.

Таблиця 2. База правил для налаштування моделі нечіткої логіки

Фрагмент коду в MATLAB®	
[Rules]	
#	f D I M g type
1.	4 2 0, 11 (0.2) : 2
2.	4 3 0, 10 (0.5) : 2
3.	2 7 0, 14 (1) : 2
4.	5 1 0, 15 (0.8) : 2
5.	1 0 0, 14 (1) : 1
6.	2 0 0, 14 (1) : 1
7.	3 0 0, 3 (0.8) : 1
8.	3 0 0, 4 (1) : 1
9.	4 0 0, 7 (1) : 1
10.	4 0 0, 13 (1) : 1
11.	4 0 0, 10 (1) : 1
12.	5 0 0, 15 (0.8) : 1
13.	4 0 0, 8 (0.2) : 1

Фрагмент коду в MATLAB®

```

14. 5 0 0, 8 (0.8) : 1
15. 0 1 0, 15 (1) : 1
16. 0 3 0, 10 (1) : 1
17. 0 2 0, 12 (1) : 1
18. 0 2 0, 11 (0.2) : 1
19. 0 4 0, 12 (0.5) : 1
20. 0 4 0, 13 (1) : 1
21. 0 6 0, 5 (0.3) : 1
22. 0 8 0, 14 (1) : 1
23. 0 7 0, 14 (1) : 1
24. 0 5 0, 6 (0.45) : 1

```

Під час імітаційного моделювання повітряної лінії електропередавання напругою 330 кВ було отримано тривимірну поверхню відгуку моделі нечіткої логіки, що відображає достовірність частоти відмов екранування (рис. 7).

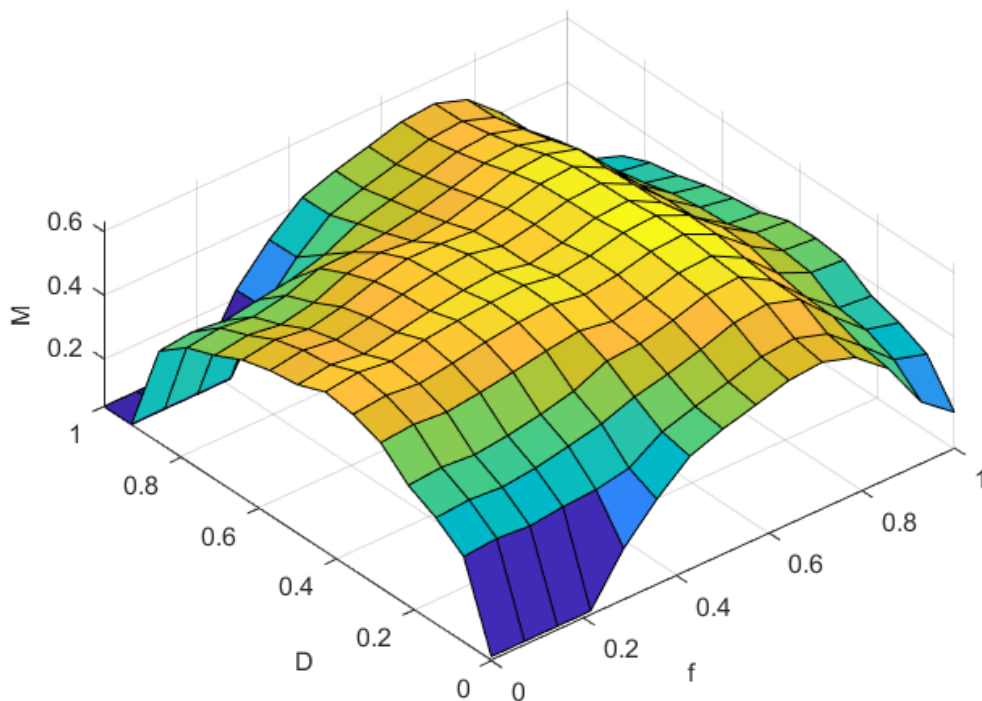


Рис. 7. Поверхня відгуку нечіткої логічної моделі

Поверхня відгуку наочно ілюструє, як зміни щільності струму блискавки та ширини зони відмови блискавкозахисту впливають на очікувану частоту відмов екранування, забезпечуючи інтуїтивно зрозумілий інструмент для інженерів з оцінки ризиків.

На рис. 8 наведено діаграму розподілу інтенсивності достовірності частоти відмов екранування повітряної лінії електропередавання як функції щільності ймовірності струму блискавки та ширини зони відмови блискавко-

захисту в просторі, обмеженому мінімальними та максимальними можливими значеннями струму блискавки.

Коефіцієнт масштабування для значень достовірності частоти відмов екранування на поверхні відгуку, які подані у відносних одиницях, для повітряної лінії електропередавання напругою 330 кВ становить 0,2.

Отримані результати можна використовувати як інженерний інструмент для швидкої оцінки ризику відмов

екранування під час проектування або модернізації повітряних ліній, що приєднують вітрові електростанції до енергосистеми. Знаючи характерну щільність грозової активності району та геометричні параметри опори (що визначають ширину зони відмови екранування), проєктувальник може за допомогою побудованої поверхні відгуку оперативно визначити очікуваний рівень достовірності частоти відмов i , за потреби, скоригувати конструкцію лінії – наприклад, змінити положення грозозахисних тросів або їх кількість. Крім того, результати моделювання можуть бути використані для

обґрунтування доцільності встановлення нелінійних обмежувачів перенапруги, які монтуються на опорах повітряних ліній паралельно гірляндам ізоляторів, що дозволяє підвищити ефективність блискавкозахисту лінії, зокрема у випадках прямого удару блискавки у фазний провідник. Таким чином, модель дає змогу комплексно оцінювати ефективність як геометричних, так і схемних заходів підвищення блискавкозахисту лінії ще на етапі проектування без виконання складних аналітичних розрахунків перехідних процесів, обумовлених грозовими процесами.

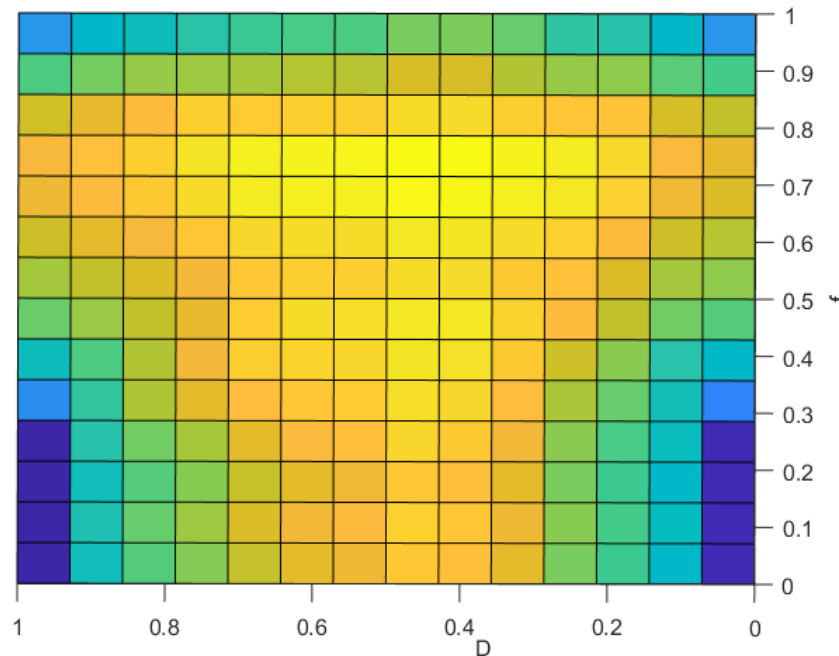


Рис. 8. Діаграма інтенсивності розподілу достовірності частоти відмов екранування лінії електропередавання напругою 330 кВ

Висновки. У роботі розроблено нечітку логічну модель оцінювання достовірності частоти відмов екранування повітряної лінії електропередавання напругою 330 кВ, призначеної для приєднання вітрової електростанції до енергосистеми. Модель реалізована за алгоритмом Мамдані в середовищі MATLAB® Fuzzy Logic Designer та враховує три вхідні лінгвістичні змінні: щільність імовірності струму блискавки f у діапазоні 0...0,0125 (1/кА), ширину зони відмови екранування D у діапазоні 0...6,754 м та струм блискавки I у діапазоні 0...10,0 кА.

У процесі синтезу бази знань кількість правил моделі було скорочено з 40 до 24 без втрати адекватності відтворення інтегральної залежності між параметрами. Вихідна змінна – достовірність частоти відмов екранування $M(SFR)$ – визначена в абсолютному діапазоні 0...0,014 з коефіцієнтом масштабування 0,2 для повітряної лінії 330 кВ.

Імітаційне моделювання показало, що максимальні значення достовірності частоти відмов екранування формуються в області поєднання підвищених значень щільності ймовірності струму блискавки (наближених до 0,0125 1/кА) та максимальної ширини зони відмови

екранування (понад 6 м). За мінімальних значень цих параметрів ($f \rightarrow 0$; $D \rightarrow 0$) вихідна величина $M(SFR)$ прямує до нуля, що відповідає фізичному змісту процесу повного екранування.

Отримана тривимірна поверхня відгуку дає змогу кількісно оцінювати достовірність частоти відмов екранування без використання складної аналітичної формалізації грозових процесів, що особливо важливо за умов обмеженості статистичних даних та невизначеності параметрів струму блискавки. Запропонований підхід може бути адаптований для повітряних ліній інших класів напруги шляхом зміни діапазонів вхідних змінних та коефіцієнта масштабування моделі.

ПОСИЛАННЯ

1. Mori F., Yamamoto K. "A study on the detection of lightning strikes on wind turbines with a camera system," 2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Langkawi, Malaysia, 2023, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APL57308.2023.10181977>.

2. Birkel J., Diendorfer G., Thern S., Kolb J., Shulzhenko E., Rock M. "Initial investigation of influence of wind farms to lightning events," 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, Portugal, 2016, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791448>.
3. The Annual Lightning Report. Total Lightning Statistics for 2023 [Сайт]. URL: <https://indd.adobe.com/view/ddf9619e-36e0-46b4-981d-3458b2532b98> (дата звернення: 13 жовтня 2025 року).
4. Zalhaf A. S., Han Y., Yang P., Wang, C., Khan M. A. "Analysis of lightning transient performance of 132 kV transmission line connected to Miramar wind farm: A case study," *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.088>
5. Wang C., Wang S., Ye L., Wang S., Xiang N., Li K., Yang Y. "Analysis of shielding failure flash-over rate of collection lines of wind farms in mountainous areas," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 617, no. 1, p. 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/617/1/012028>
6. Yang Y., Wang S., Wang S., Wang Q., Xie W., Ye L., Tu J., Zhang X., Li G., Xiang N. "Lightning trip-out risk assessment and differential lightning protection of 35 kV transmission lines in mountain wind farm," *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 581–588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.171>
7. Sun Q., Yang L., Li Q., Zhang X., Wang F., Chen S., Zhong, L. "Surge analysis for lightning strike on overhead lines of wind farm," *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 194, p. 107066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107066>
8. Троценко Є. О., Кирик В. В. «Синтез лінгвістичних моделей для відтворення впливу блискавки на частоту відмов екранування повітряної лінії електропередавання». *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. № 1(79). С. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324214>
9. Kyryk V. V., Shatalov Y. O. "Load forecasting in electrical grids: Analysis of methods and their trends," *Problemele Energeticii Regionale*, 2025, vol. 1, no. 65, pp. 12–36. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.02>
10. Grid Connection Design for 40 MW Wind Power Plant – 110 kV Feeder & Substation Upgrade Project [Сайт]. URL: <https://voltageg.com/en/projects/grid-connection-design-for-40-mw-wind-power-plant-110-kv-feeder-substation-upgrade-project> (дата звернення: 13 жовтня 2025 року).
11. Rye Park Wind Farm 330kV Transmission Line [Сайт]. URL: <https://www.genus.com.au/projects/rye-park-wind-farm-330kv-transmission-line> (дата звернення: 13 жовтня 2025 року).
12. В Україні у 2026 році запустять до 600 МВт нових вітрових електростанцій [Сайт]. URL: <https://finteco.com.ua/article/33189-v-ukraini-u-2026-rotsi-zapustiat-do-600-mvt-novykh-vitrovykh-elektrostantsiy/> (дата звернення: 27 лютого 2026 року).
13. Häusler M., Schlayer G., Fitterer G. "Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings," *ABB review*, 1997, no. 3, pp. 4–11.
14. Takami J., Okabe S. "Characteristics of direct lightning strokes to phase conductors of UHV transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 537–546. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.887102>
15. IEEE Std 1243-1997. "IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines," 1997, pp. 1–44. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.84660>

FUZZY LOGIC MODEL FOR CREDIBILITY ASSESSMENT OF THE LIGHTNING SHIELDING FAILURE RATE IN OVERHEAD POWER LINES INTENDED FOR CONNECTING WIND POWER PLANTS TO THE GRID

Received Nov. 26, 2025; accepted Mar. 23, 2026
Available online Mar. 31, 2026

Kyryk V.¹, Trotsenko Y.²

Author for correspondence: Trotsenko Yevgeniy,
e-mail: trotsenko2014@gmail.com

¹ Dr. of Tech. Sciences, Professor
<https://orcid.org/0000-0003-0419-8934>

² Cand. of Tech. Sciences, Associate Professor
<https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

^{1, 2} National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Abstract. *A fuzzy logic-based linguistic model is developed to assess the reliability of lightning shielding failure rates in overhead transmission lines connecting wind farms to the grid. The model integrates key parameters, including the probability density of lightning current and the width of the shielding failure zone, to capture their combined effect on line vulnerability. Input and output variables are represented by fuzzy term sets with defined membership functions, and a reduced rule base synthesizes the relationships among variables. Simulation modeling of a 330 kV transmission line demonstrates the response surface and intensity distribution of shielding failure credibility, enabling rapid estimation of failure rates without analytical formalization. The approach can be adapted for high-voltage lines of various classes by adjusting scaling coefficients, providing a practical tool for designing and evaluating lightning protection systems in wind power integration.*

Keywords: *fuzzy logic, high-voltage transmission lines, lightning current, lightning protection, shielding failure rate, simulation modeling, wind farms, wind power integration.*

List of symbols and abbreviations

EGM – Electro-Geometric Model

HVAC – High Voltage Alternating Current

HVDC – High Voltage Direct Current

WPP – Wind Power Plant

Introduction. With the increasing contribution of wind energy to the overall energy mix and the installation of a large number of wind turbines, the risk of lightning strikes to these structures has become a significant concern [1, 2]. Due to their height and placement on hilltops or in open areas, the likelihood of direct lightning strikes to wind energy installations is expected to be considerably higher than for conventional energy facilities. According to a report [3], in 2023 alone, more than 77,000 lightning strikes occurred to wind turbines in the United States, with two wind farms experiencing over 1,000 strikes each. However, the problem is much broader, as lightning poses a hazard not only to the wind turbines themselves but also to surrounding infrastructure and systems.

It can be argued that in recent years, the issues related to lightning protection of overhead power lines specifically serving wind power plant (WPP) integration into the grid have evolved into a distinct area of focus within the broader field of lightning protection [4, 5]. As the number and scale of wind power installations continue to grow, often in remote, elevated, and lightning-prone areas, the transmission lines connecting them to national grids face unique challenges not typically encountered in conventional grid infrastructure. These challenges include exposure to harsh environmental conditions such as high winds

and icing; increased susceptibility to direct lightning strikes; complex grounding conditions; and specific lightning protection features of wind power substations, whose design differs from that of conventional electrical substations [6, 7]. As a result, specialized approaches are required, including tailored surge protection, optimized grounding systems, advanced lightning protection of overhead lines, and the deployment of high-performance line arresters. This growing complexity and critical importance of reliably integrating renewable energy sources into transmission networks justify recognizing lightning protection of overhead transmission lines connected to wind farm substations as a specialized sub-discipline. This emerging field is closely related to established areas such as lightning protection of overhead transmission lines in High Voltage Alternating Current (HVAC) systems, High Voltage Direct Current (HVDC) systems, and transmission lines routed through mountainous regions. Traditional methods for calculating the risk of lightning shielding failure are continually evolving, driven by advances in our understanding of lightning behavior and its associated characteristics. The increasing demand for higher protection efficiency, particularly in critical infrastructure such as overhead power lines connected to large wind power plants, has highlighted the limitations of conventional techniques and underscored the need for

innovative approaches. Recent studies indicate that fuzzy logic offers a promising solution to these challenges [8, 9], as it enables the modeling of complex and uncertain phenomena that are inherent to lightning protection systems. By accommodating ambiguity and variability in key parameters, fuzzy logic enhances the credibility of risk assessments and supports more resilient system design.

Until recently, overhead transmission lines with voltage levels up to 220 kV were predominantly used for connecting wind power plants or wind farms to the electrical grid [4, 10]. However, the continuous growth in wind turbine dimensions, both in height and rated capacity, has led to a corresponding increase in the power output of wind farms, necessitating the use of higher voltage transmission infrastructure. As a result, the deployment of 330 kV overhead lines for grid connection of large-scale wind farms is becoming more widespread, as demonstrated by projects such as the Rye Park Wind Farm 330 kV transmission line [11]. Higher voltage transmission lines are typically supported by taller towers, which are more susceptible to direct lightning strikes due to their greater exposure. Consequently, accurate estimation of the expected number of lightning protection failures, particularly shielding failures, on 330 kV lines is becoming a critical consideration not only in the domain of electric networks but also in the broader context of renewable energy integration and infrastructure reliability.

In Ukraine, wind energy remains an important component of renewable generation, and despite the war, it is actively developing: according to industry associations, construction and commissioning of wind power plants with a total capacity of about 500–600 MW is expected during 2026, which is a significant increase compared to previous years and indicates a steady interest of investors in this energy segment [12]. At the same time, renewable energy associations, together with the transmission system operator, are working to address key barriers, such as connecting new capacities to the power grid, which directly affects the reliability of electricity transmission from wind farms to consumers and creates additional requirements for lightning protection systems for overhead lines.

Problem statement. The purpose of this study is to develop a fuzzy logic model for assessing the credibility of the failure rate of shielding against lightning discharges into overhead power lines intended for connecting wind power plants to the power grid. The need for such an approach is due to the uncertainty of lightning current parameters, the variability of thunderstorm activity conditions, and the limited statistical data on shielding system failures.

The proposed model, based on the mathematical framework of fuzzy logic, enables us to formalize expert knowledge and take into account the fuzziness of input parameters, in particular the probability density function of the lightning current and the spatial width of the shielding failure zone within the interval between the minimum and

maximum current values, at which complete shielding of the line is either ensured or violated. This allows for more accurate assessment of shielding failure frequency and the reliability of power transmission lines that deliver electricity from wind power plants.

Materials and results. A direct lightning strike to a phase conductor of an overhead power transmission line leading to a wind farm can have several critical consequences affecting both the transmission infrastructure and the connected renewable generation facility. The high amplitude and steep front of lightning current can induce overvoltage that exceeds the insulation strength of line components, potentially resulting in electrical flashovers to grounded structures such as towers or cross-arms. This can lead to phase-to-ground faults, triggering the disconnection of the affected line segment by protection systems and causing temporary or prolonged interruptions in power delivery from the wind farm to the grid. Repeated lightning-induced faults may accelerate insulation degradation, damage line hardware, or compromise the integrity of surge protection devices. Additionally, the electromagnetic interference generated by the strike can affect nearby control and communication systems, further complicating system restoration and stability. As wind farms are often located in open or elevated terrains with higher lightning exposure, the risk and impact of such events are particularly significant, necessitating robust lightning protection and fault mitigation strategies.

Failure or insufficient efficiency of the lightning protection system on the overhead line connecting the wind farm substation to the electrical grid directly affects the operation of the entire wind farm. In this case, for the wind farm itself, this may mean a forced shutdown of the power supply of to the grid, the activation of protection systems and the automatic shutdown of wind turbines. Individual or all generators may stop, the equipment may go into emergency mode and need to be restarted after the damage is repaired. This leads to loss of electricity generation, loss of income from electricity sales and a decrease in the utilization factor of the installed capacity of the wind farm.

Overhead transmission lines are typically equipped with lightning shielding (or grounding) wires designed to protect phase conductors from direct lightning strikes. However, if a direct strike to a phase conductor occurs despite the presence of shield wires, this event is referred to as a lightning shielding failure. This phenomenon can be illustrated graphically using the electro-geometric model (EGM) of a direct lightning strike to an overhead line. Based on the concept of the electro-geometric model, this phenomenon is explained by the fact that at certain values of lightning current, there is an area near the phase conductor where the lightning shield wire does not perform its protective function. A lightning flash propagating from a thundercloud that reaches this region will result in a direct strike to the phase conductor (Fig. 1).

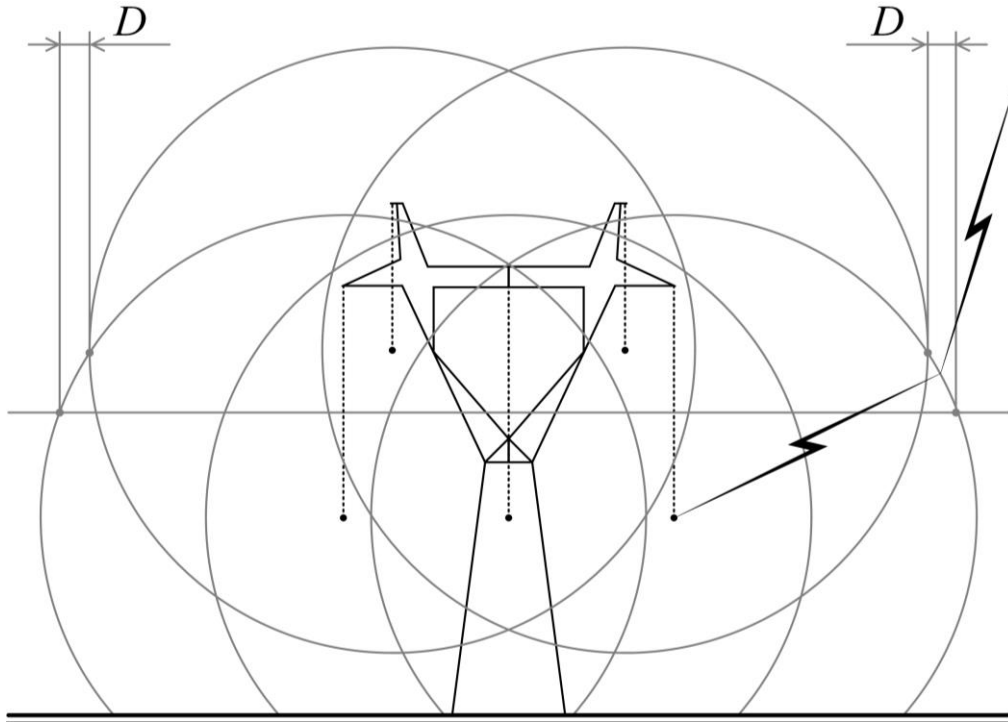


Fig. 1. Graphical representation of lightning shielding failure based on the electro-geometric model

In Fig. 1: D is the lightning exposure distance, where overhead shield wires do not protect phase conductors. The graphical constructions in Fig. 1 were performed using the drawing of an actual 330 kV transmission line tower published in an open-access journal [13], for a lightning current of 3 kA.

The electro-geometric model primarily makes it possible to determine the dimensions and spatial position of the lightning exposure distance in the vicinity of the conductor. However, it also provides insight into the possible trajectory of a lightning discharge during a direct strike to the conductor. One such example is shown above in Fig. 1. In photographs capturing lightning strikes to phase conductors, the discharge trajectory demonstrates similar behavior: the lightning initially propagates vertically downward and then bends to strike the phase conductor almost horizontally from the side of the transmission line [14], illustrating the shielding effect of the overhead ground wires.

The effectiveness of lightning protection in overhead power transmission lines is commonly evaluated using the Shielding Failure Rate (SFR). This parameter represents the expected number of lightning flashes that can bypass the shielding (ground) wire and strike a phase conductor within a given time interval. Typically, it is expressed as the number of such flashes per 100 km of transmission line per year. Such an event may be accompanied by an electrical flashover from the conductor to the grounded cross-arm, although it does not necessarily result in one. For an overhead power transmission line with a horizontally arranged phase configuration that is geometrically symmetrical with respect to the middle phase, this parameter is calculated according to the following formula [15]:

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

where: SFR – shielding failure rate of the overhead power transmission line, flashes/year; N_g – ground flash density in

the area along the transmission line route, flashes/(km²·year); L – length of the overhead power transmission line connected to the wind farm substation, km; $D(I)$ – lightning exposure distance corresponding to a shielding failure, m; $f(I)$ – probability density function of the first return-stroke current, 1/kA; I – peak value of the prospective lightning current, kA; I_{min} – lower threshold of lightning current, which is generally assumed to be not less than 3 kA; I_{max} – upper threshold of lightning current corresponding to the condition of complete shielding, kA. The last parameter in this list depends on the structural features of the transmission line tower and is unique for each specific type of transmission line. The condition of complete shielding means that, starting from a certain lightning current value, a direct strike to the phase conductor becomes impossible, and the lightning can only strike either the overhead ground wire or the ground near the transmission line.

The credibility of the shielding failure rate for an overhead transmission line can be linguistically expressed by a fuzzy logic model (FLM) function given by the following expression.

$$M(SFR) = f_{FLM} \left(\int_{I_{min}}^{I_{max}} D(I) \cdot f(I) \cdot dI \right). \quad (2)$$

In this case, taking into account formulas (1) and (2), the shielding failure rate can be written as:

$$SFR = 2 \times 10^{-3} \cdot N_g \cdot L \cdot M(SFR). \quad (3)$$

A fuzzy logic model (Fig. 2) of the credibility assessment of the shielding failure rate for a 330 kV overhead transmission line was developed using the Fuzzy Logic Designer tool in the MATLAB® environment. The model, implemented according to the Mamdani inference algorithm, represents the integral relationship between the shielding failure rate, the probability density function of the lightning current, and the width of the lightning shielding failure zone within the range of lightning current values corresponding to perfect shielding.

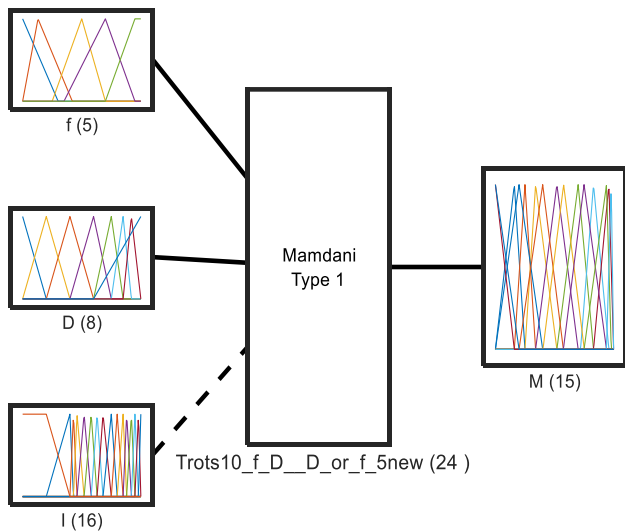


Fig. 2. Fuzzy logic model representing the credibility function of the shielding failure rate for overhead power transmission lines

The model has the following system characteristics, which are listed in Table 1.

Table 1. System characteristics of the fuzzy logic model of the credibility function of the shielding failure rate of overhead transmission lines

Code fragment in MATLAB®
[System] Name='Trots10_f_D__D_or_f_5new'; Type='mamdani'; Version=2.0; NumInputs=3;

Code fragment in MATLAB®

```

NumOutputs=1;
NumRules=24;
AndMethod='min';
OrMethod='max';
ImpMethod='min';
AggMethod='max';
DefuzzMethod='centroid'.

```

According to expression (2), the input linguistic variables are defined as follows: probability density of the lightning current – term “ f ”; width of the lightning shielding failure zone – term “ D ”; and lightning current – term “ I ”. The output linguistic variable is represented as the shielding failure rate – term “ M ”.

According to statistical modeling, the set of possible values of the linguistic variable representing the probability density of the lightning current, f , within a given range $\{0...0.0125\}$ in absolute units, is represented as a fuzzy term set $T_f = \{Z, AZ, L, VL, A\}$ with corresponding membership functions defined over the relative interval $\{0...1\}$. Fig. 3 graphically illustrates the intervals of the fuzzy sets as described by the membership functions $\mu(Z)$, $\mu(AZ)$, $\mu(L)$, $\mu(VL)$, $\mu(A)$ along with their corresponding shapes over the physical range of the lightning current probability density values. The membership functions allow assigning to each physical value of the linguistic variable f a degree of membership μ , ranging from 0 to 1, to the respective fuzzy sets defined on the universe of discourse.

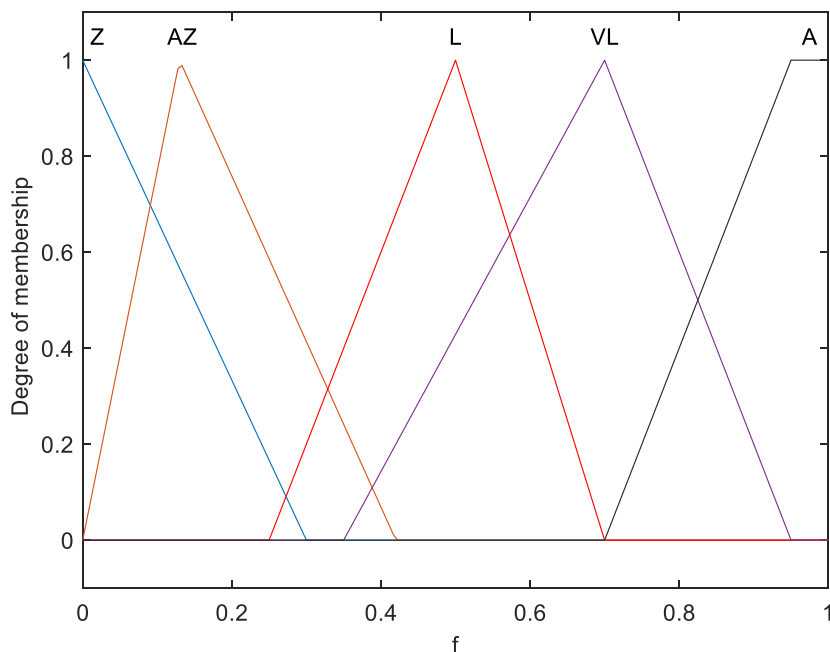


Fig. 3. Membership functions of the linguistic variable f for the probability density of lightning current

According to statistical modeling, the set of possible values of the input linguistic variable representing the width of the lightning shielding failure zone, D , within a given range $\{0 \dots 6.754\}$ in absolute units — meters, is represented by a fuzzy term set $T_D = \{Z, S, VS, A, VA, H, VH, AVH\}$ with eight corresponding membership functions defined over the relative interval $\{0 \dots 1\}$. Fig. 4 graphically illustrates the intervals

of the fuzzy sets as described by their membership functions $\mu(Z), \mu(S), \mu(VS), \mu(A), \mu(VA), \mu(H), \mu(VH), \mu(AVH)$ along with their respective shapes over the physical range of the lightning shielding failure zone width. The membership functions allow assigning to the physical values of the linguistic variable D a degree of membership μ , ranging from 0 to 1, to the corresponding fuzzy sets defined over the universe of discourse.

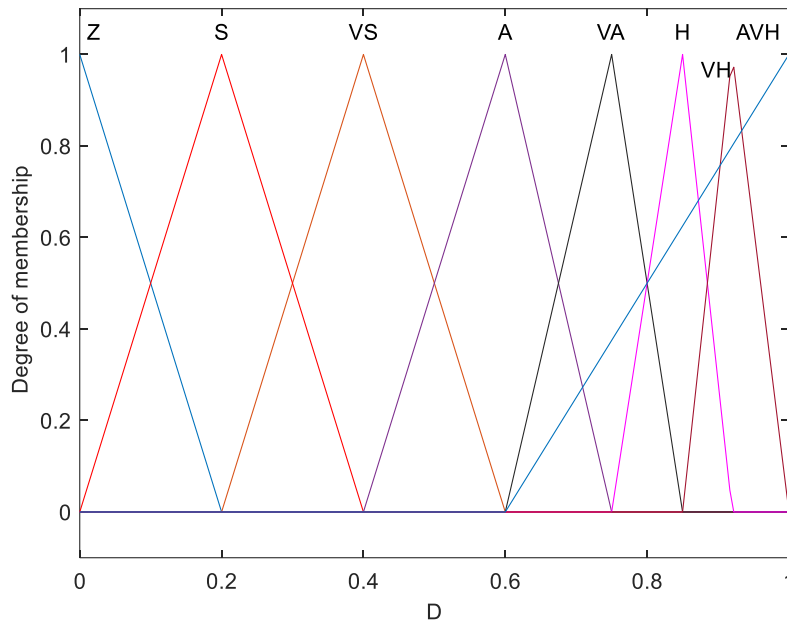


Fig. 4. Membership functions of the linguistic variable D for the lightning shielding failure width

The third input linguistic variable, lightning current I , within the range of 0 to 10 kA, is represented by a fuzzy term set $T_I = \{I_0, I_1, \dots, I_{14}, I_{15}\}$ with sixteen membership functions defined over a relative interval $\{0 \dots 1\}$, distributed across the fuzzy sets on a normalized scale. Fig. 5 graphically presents

the intervals of the fuzzy sets as described by the corresponding membership functions $\mu(I_0), \mu(I_1), \dots, \mu(I_{14}), \mu(I_{15})$ along with their respective shapes over the physical range of lightning current values. These membership functions are implicitly embedded within the structure of the model.

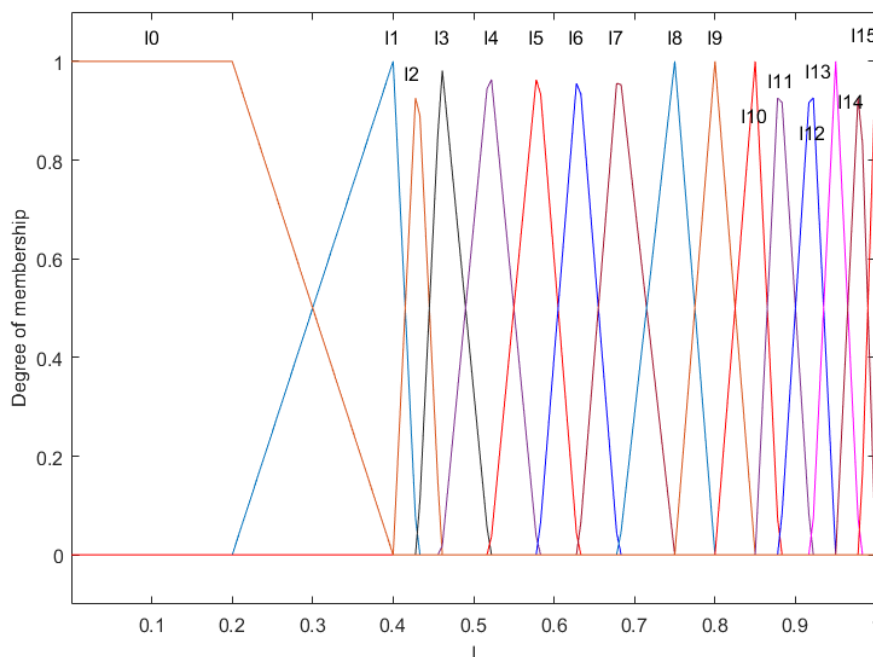


Fig. 5. Membership functions of the linguistic variable I for the lightning current

Based on analytical assessment and statistical modeling, the set of possible values of the output linguistic variable representing the credibility of the shielding failure rate of a transmission line $M(SFR)$, within a given range $\{0...0.014\}$ in absolute units, is represented by a fuzzy term set with fifteen corresponding membership functions $T_M = \{Z, GZ, GVL, GL, GA, GAA, GH, GVH, ZE, RZ, RL, RA, RVA, RH, RVH\}$

defined over a relative interval $\{0...1\}$. Fig. 6 graphically illustrates the intervals of the fuzzy sets as described by their membership functions $\mu(Z)$, $\mu(GZ)$, $\mu(GVL)$, $\mu(GL)$, $\mu(GA)$, $\mu(GAA)$, $\mu(GH)$, $\mu(GVH)$, $\mu(ZE)$, $\mu(RZ)$, $\mu(RL)$, $\mu(RA)$, $\mu(RVA)$, $\mu(RH)$, $\mu(RVH)$, along with their respective shapes over the physical range of the credibility of the shielding failure rate of the transmission line $M(SFR)$.

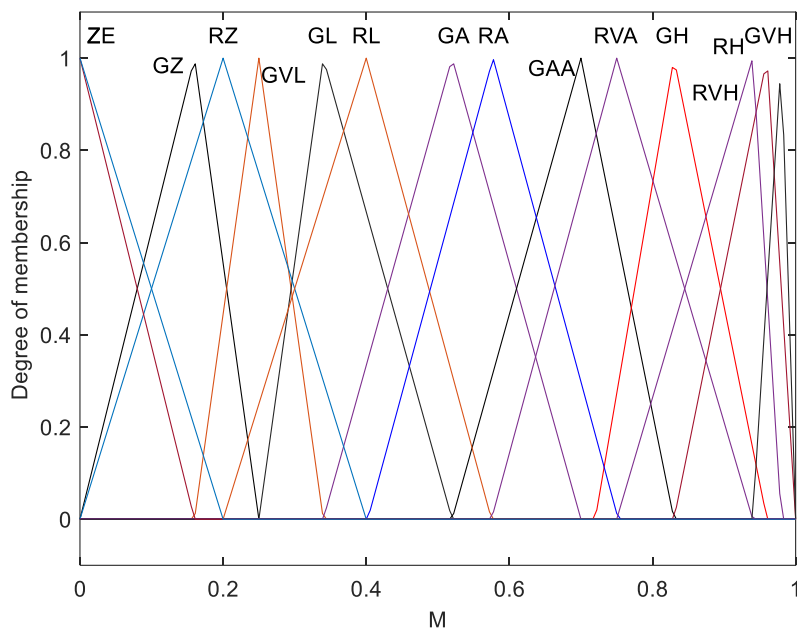


Fig. 6. Membership functions of the linguistic variable M for the credibility of lightning shielding failure rate

The membership functions of the third input linguistic variable, lightning current I are not explicitly included in the rule base. Instead, they serve as a linking term set between the input linguistic variables, namely, the probability density of the lightning current f and the width of the lightning shielding failure zone D , and the output linguistic variable, the shielding failure rate M , during the rule formation stage of the model. In other words, based on the term set of the membership functions of the lightning current variable, the term sets of the input linguistic variables – probability density of the lightning current and width of the lightning shielding failure width are synthesized and logically associated with the term sets of the output linguistic variable – shielding failure rate:

$$T_I \xrightarrow{T_f/T_D} T_M.$$

Such an approach significantly simplifies the synthesis of rules and reduces their number in the model's knowledge base. During the model tuning process, the rule base was reduced from 40 to 24 rules. The structure of these rules is presented below in Table 2, with the membership functions numbered according to their order within the corresponding term sets.

Table 2. Rule base for fuzzy logic model tuning

Code fragment in MATLAB®					
[Rules]					
#	f	D	I	M	g type
1.	4	2	0	11	(0.2) : 2
2.	4	3	0	10	(0.5) : 2

Code fragment in MATLAB®	
3.	2 7 0, 14 (1) : 2
4.	5 1 0, 15 (0.8) : 2
5.	1 0 0, 14 (1) : 1
6.	2 0 0, 14 (1) : 1
7.	3 0 0, 3 (0.8) : 1
8.	3 0 0, 4 (1) : 1
9.	4 0 0, 7 (1) : 1
10.	4 0 0, 13 (1) : 1
11.	4 0 0, 10 (1) : 1
12.	5 0 0, 15 (0.8) : 1
13.	4 0 0, 8 (0.2) : 1
14.	5 0 0, 8 (0.8) : 1
15.	0 1 0, 15 (1) : 1
16.	0 3 0, 10 (1) : 1
17.	0 2 0, 12 (1) : 1
18.	0 2 0, 11 (0.2) : 1
19.	0 4 0, 12 (0.5) : 1
20.	0 4 0, 13 (1) : 1
21.	0 6 0, 5 (0.3) : 1
22.	0 8 0, 14 (1) : 1
23.	0 7 0, 14 (1) : 1
24.	0 5 0, 6 (0.45) : 1

During the simulation modeling of a 330 kV transmission line, a three-dimensional response surface of the fuzzy logic

model representing the credibility of the shielding failure rate was obtained (Fig. 7).

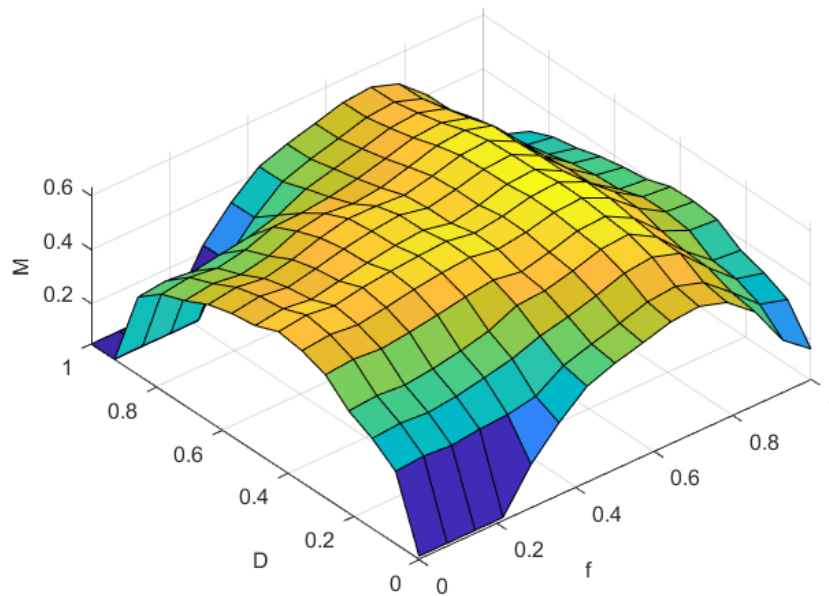


Fig. 7. Response surface of the fuzzy logic model

The response surface visually illustrates how variations in lightning current density and shielding failure zone width influence the expected shielding failure rate, providing an intuitive tool for engineers to assess risk.

Fig. 8 below presents the intensity distribution diagram of the credibility of the shielding failure rate of the transmission line as a function of the probability density of the

lightning current and the width of the lightning protection failure zone within the space bounded by the minimum and maximum possible lightning current values.

The scaling factor for the values of the shielding failure rate credibility on the response surface, which is presented in relative units, for a 330 kV transmission line is 0.2.

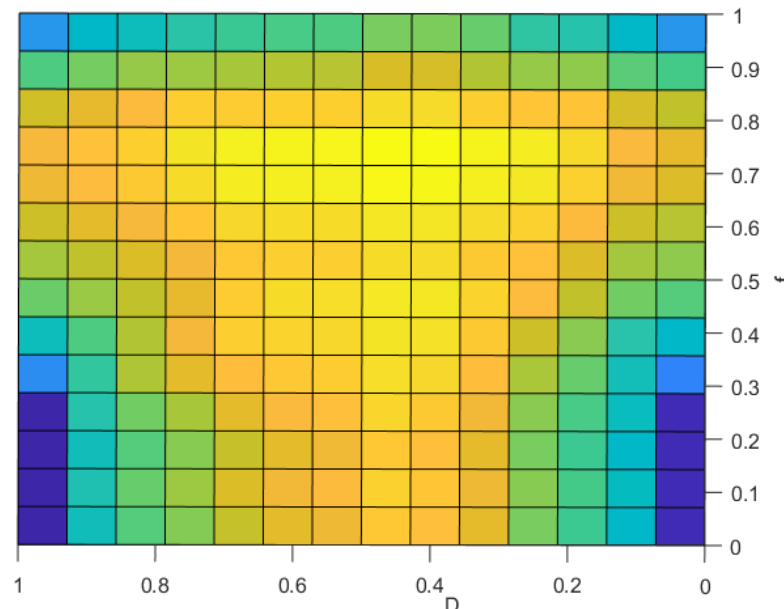


Fig. 8. Intensity distribution diagram of the credibility of the shielding failure rate for a 330 kV transmission line

The results obtained can be used as an engineering tool for rapid assessment of the risk of shielding failures during the design or modernization of overhead lines connecting wind farms to the power grid. Knowing the characteristic density of thunderstorm activity in the area and the geometric parameters of the tower (which determine the width of the shielding failure zone), the designer can quickly determine the expected level of credibility of the failure rate using the

constructed response surface and, if necessary, adjust the line design - for example, change the position of lightning protection cables or their number. In addition, the modeling results can be used to justify the feasibility of installing non-linear surge arresters, which are mounted on overhead line towers parallel to the insulator strings, which enhances the lightning protection effectiveness of the line, in particular in cases of direct lightning strike to the phase conductor. Thus,

the model allows for a comprehensive assessment of the effectiveness of both geometric and schematic measures to increase the lightning protection of the line at the design stage without performing complex analytical calculations of transient processes caused by thunderstorm processes.

Conclusions. The paper develops a fuzzy logic model for assessing the credibility of the failure rate of the shielding of a 330 kV overhead power line intended for connecting a wind power plant to the power system. The model is implemented using the Mamdani algorithm in the MATLAB® Fuzzy Logic Designer environment and takes into account three input linguistic variables: the lightning current probability density f in the range 0...0.0125 (1/kA), the width of the shielding failure zone D in the range 0...6.754 m, and the lightning current I in the range 0...10.0 kA.

In the process of knowledge base synthesis, the number of model rules was reduced from 40 to 24 without compromising the adequacy of the reproducing the integral dependence between the parameters. The output variable — the credibility of the shielding failure rate $M(SFR)$ — is defined within the absolute range 0...0.014 with a scaling factor of 0.2 for a 330 kV overhead line.

Simulation results showed that the maximum credibility values of the shielding failure frequency rate occur in the region where increased lightning current probability density (around 0.0125 1/kA) and the maximum width of the shielding failure zone (over 6 m) combine. When these parameters approach the minimum values ($f \rightarrow 0$; $D \rightarrow 0$), the output variable $M(SFR)$ tends to zero, which corresponds to the physical content of the complete shielding process.

The obtained three-dimensional response surface allows us to quantitatively assess the credibility of the shielding failure frequency without using complex analytical formalization of lightning processes, which is especially important under conditions of limited statistical data and uncertainty of lightning current parameters. The proposed approach can be adapted for overhead lines of other voltage classes by adjusting the ranges of the input variables and the scaling factor of the model.

REFERENCES

- Mori F., Yamamoto K. "A study on the detection of lightning strikes on wind turbines with a camera system," 2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Langkawi, Malaysia, 2023, pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/APL57308.2023.10181977>.
- Birkel J., Diendorfer G., Thern S., Kolb J., Shulzhenko E., Rock M. "Initial investigation of influence of wind farms to lightning events," 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Estoril, Portugal, 2016, pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791448>.
- The Annual Lightning Report. Total Lightning Statistics for 2023 [Site]. URL: <https://indd.adobe.com/view/ddf9619e-36e0-46b4-981d-3458b2532b98> (accessed: October 13, 2025).
- Zalhaf A. S., Han Y., Yang P., Wang, C., Khan M. A. "Analysis of lightning transient performance of 132 kV transmission line connected to Miramar wind farm: A case study," Energy Reports, 2022, vol. 8, pp. 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.088>
- Wang C., Wang S., Ye L., Wang S., Xiang N., Li K., Yang Y. "Analysis of shielding failure flash-over rate of collection lines of wind farms in mountainous areas," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, vol. 617, no. 1, p. 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/617/1/012028>
- Yang Y., Wang S., Wang S., Wang Q., Xie W., Ye L., Tu J., Zhang X., Li G., Xiang N. "Lightning trip-out risk assessment and differential lightning protection of 35 kV transmission lines in mountain wind farm," Energy Reports, 2022, vol. 8, pp. 581-588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.171>
- Sun Q., Yang L., Li Q., Zhang X., Wang F., Chen S., Zhong, L. "Surge analysis for lightning strike on overhead lines of wind farm," Electric Power Systems Research, 2021, vol. 194, p. 107066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107066>
- Trotsenko Y., Kyryk V. "Synthesis of linguistic models for replicating the impact of lightning on the shielding failure rate of an overhead power transmission line," Power Engineering: Economics, Technique, Ecology, 2025, vol. 1, no. 79, pp. 71-79. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2025.324214> (in Ukrainian)
- Kyryk V. V., Shatalov Y. O. "Load forecasting in electrical grids: Analysis of methods and their trends," Problemele Energeticii Regionale, 2025, vol. 1, no. 65, pp. 12-36. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.1-65.02>
- Grid Connection Design for 40 MW Wind Power Plant – 110 kV Feeder & Substation Upgrade Project [Site]. URL: <https://voltageg.com/en/projects/grid-connection-design-for-40-mw-wind-power-plant-110-kv-feeder-substation-upgrade-project> (accessed: October 13, 2025).
- Rye Park Wind Farm 330kV Transmission Line [Site]. URL: <https://www.genus.com.au/projects/rye-park-wind-farm-330kv-transmission-line> (accessed: October 13, 2025).
- Up to 600 MW of new wind power plants will be launched in Ukraine in 2026 [Site]. URL: <https://finteco.com.ua/article/33189-v-ukraini-u-2026-rotsi-zapustiat-do-600-mvt-novykh-vitrovykh-elektrostantsiy/> (accessed: February 27, 2026).
- Häusler M., Schlager G., Fitterer G. "Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings," ABB review, 1997, no. 3, pp. 4-11.
- Takami J., Okabe S. "Characteristics of direct lightning strokes to phase conductors of UHV transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 537-546. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.887102>
- IEEE Std 1243-1997. "IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines," 1997, pp. 1-44. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.84660>