

УДК 621.311

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.195897

ОЦІНЮВАННЯ ІМОВІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ НА ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Літвінов В. В., Костерев М. В.

ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Литвинов В. В., Костерев Н. В.

ESTIMATION OF THE SHORT CIRCUIT ACCIDENT PROBABILITY AT THE OVERHEAD ELECTRIC TRANSMISSION LINES

Litvinov V., Kosterev M.

Об'єктом дослідження є імовірнісні характеристики виникнення короткого замикання (КЗ) на повітряних лініях електропередачі (ЛЕП) класів напруги 110 кВ і вище, відмова яких може призвести до розвитку аварії в електроенергетичній системі (ЕЕС). Імовірнісні характеристики виникнення КЗ на ЛЕП залежать від великої кількості факторів: довжини та траси проходження ЛЕП, класу напруги, погодних умов, кваліфікації персоналу, в віданні, управлінні та обслуговуванні якого знаходиться ЛЕП. Найбільш проблемними питаннями при оцінці імовірності виникнення КЗ на повітряних ЛЕП є виділення пошкоджуваності від КЗ із загальної статистики пошкоджень, кількісне врахування таких особливостей функціонування повітряних ЛЕП, як метеорологічні умови, рівень кваліфікації персоналу та технічний стан окремої одиниці обладнання.

В ході дослідження розроблено нечітко-статистичний підхід до оцінювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП з урахуванням її індивідуальних особливостей роботи, таких як кваліфікаційний рівень обслуговуючого персоналу, метеорологічні умови функціонування та технічний стан ЛЕП. Для визначення безумовної імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП використовуються статистичні дані щодо КЗ на лініях відповідного класу напруги. Технічний стан ЛЕП та метеорологічні умови функціонування кількісно оцінюються за нечіткими моделями, кваліфікаційний рівень персоналу визначається на стандартних інтервалах шкали Харрінгтона. Умовні імовірності стану функціонування ЛЕП визначаються за допомогою спрощеного нечіткого виводу, що дає можливість кількісної оцінки умовної імовірності при відсутності чітких аналітичних зв'язків між ознаками умов роботи ЛЕП.

Отримані за розробленим підходом результати рекомендовано використовувати в зачах ризик-орієнтованого управління ЕЕС для підвищення надійності функціонування шляхом зниження величини ризику розвитку

системної аварії при виникненні КЗ в елементах ЕЕС. Також визначено обмеження на застосування розробленого підходу в задачах оцінювання імовірності відмови обладнання та організації ризик-орієнтованого управління.

Ключові слова: коротке замикання, лінія електропередачі, технічний стан, рівень кваліфікації персоналу, метеорологічні умови, функції приналежності, еталонні матриці.

Объектом исследования являются вероятностные характеристики возникновения короткого замыкания (КЗ) на воздушных линиях электропередачи (ЛЭП) классов напряжения 110 кВ и выше, отказ которых может привести к развитию аварии в электроэнергетической системе (ЭЭС). Вероятностные характеристики возникновения КЗ на ЛЭП зависят от большого числа факторов: длины и трассы прохождения ЛЭП, класса напряжения, погодных условий, квалификации персонала, в ведении, управлении и обслуживании которого находится ЛЭП. Наиболее проблемными вопросами при оценке вероятности возникновения КЗ на воздушных ЛЭП являются выделение повреждаемости от КЗ из общей статистики повреждений, количественный учет таких особенностей функционирования воздушных ЛЭП как метеорологические условия, уровень квалификации персонала и техническое состояние отдельной единицы оборудования.

В ходе исследования разработан нечетко-статистический подход к оцениванию вероятности возникновения КЗ на воздушной ЛЭП с учетом её индивидуальных особенностей работы, таких как квалификационный уровень обслуживающего персонала, метеорологические условия функционирования и техническое состояние ЛЭП. Для определения безусловной вероятности возникновения КЗ на воздушной ЛЭП используются статистические данные о КЗ на линиях соответствующего класса напряжения. Техническое состояние ЛЭП и метеорологические условия функционирования количественно оцениваются по нечетким моделям, квалификационный уровень персонала определяется на стандартных интервалах шкалы Харрингтона. Условные вероятности состояния функционирования ЛЭП определяются с помощью упрощенного нечеткого вывода, что дает возможность количественной оценки условной вероятности при отсутствии четких аналитических связей между характеристиками условий работы ЛЭП.

Полученные по разработанному подходу результаты рекомендуется использовать в задачах риск-ориентированного управления ЭЭС для повышения надежности функционирования путем снижения величины риска развития системной аварии при возникновении КЗ в элементах ЭЭС. Также определены ограничения на применение разработанного подхода в задачах оценивания вероятности отказа оборудования и организации риск-ориентированного управления.

Ключевые слова: короткое замыкание, линия электропередачи, техническое состояние, уровень квалификации персонала, метеорологические условия, функции принадлежности, эталонные матрицы.

1. Вступ

В сучасних умовах роботи електроенергетичної системи (ЕЕС) важливою задачею є забезпечення її надійного та ефективного функціонування. При вирішенні цієї задачі необхідно враховувати, що значна кількість обладнання працює понад нормативний термін експлуатації, а рівень кваліфікації оперативного та обслуговуючого персоналу не завжди є достатнім. Також, починаючи з 2019 року робота ЕЕС, наприклад України, в новому ринку електричної енергії призводить до обтяження електричних режимів її обладнання.

Аналіз сучасних світових підходів до організації ефективного та надійного управління ЕЕС показав доцільність використання ризик-орієнтованого управління, основною кількісною характеристикою якого є ризик [1]. Ризик представляє собою добуток імовірності виникнення аварії та її наслідків [2] і є кількісною характеристикою надійності ЕЕС на інтервалі часу.

Однією з основних причин виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС є короткі замикання (КЗ). Так, згідно з [3] 65–85 % всіх відмов в ЕЕС є саме наслідком КЗ. Таким чином, в задачах оцінювання ризику розвитку аварійної ситуації в ЕЕС важливим є оцінювання імовірності виникнення КЗ в її елементах. Найбільш вразливими елементам ЕЕС згідно з [4] є повітряні лінії електропередачі (ЛЕП). Саме на них через те, що вони є розподіленим у просторі, а не зосередженим об'єктом, відбувається до 80 % всіх КЗ в ЕЕС.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є імовірнісні характеристики виникнення КЗ на повітряних ЛЕП класів напруги 110 кВ і вище, відмова яких може призвести до розвитку аварії в ЕЕС. Дані характеристики коригуються для кожної конкретної повітряної ЛЕП з урахуванням індивідуальних умов її функціонування. Імовірнісні характеристики виникнення КЗ на ЛЕП залежать від великої кількості факторів: довжини та траси проходження ЛЕП, класу напруги, погодних умов, кваліфікації персоналу, в віданні, управлінні та обслуговуванні якого знаходиться ЛЕП. Статистичні дані по КЗ на ЛЕП зазвичай враховують лише усереднені показники та генеральну сукупність перерахованих факторів.

Найбільш проблемними питаннями при оцінці імовірності виникнення КЗ на повітряних ЛЕП є виділення пошкоджуваності від КЗ із загальної статистики пошкоджень, кількісне врахування таких особливостей функціонування повітряних ЛЕП, як метеорологічні умови, рівень кваліфікації персоналу та технічний стан окремої одиниці обладнання.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є розроблення нечітко-статистичного підходу до оцінювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП в умовах неповноти та нечіткості вихідної інформації, яка полягає у стохастичності зовнішніх процесів, що впливають на стан повітряної ЛЕП. Відповідно до поставленої мети в роботі розв'язуються наступні задачі:

1. Визначення інтегральних функцій розподілу імовірності виникнення КЗ на повітряних ЛЕП на основі наявних статистичних даних.

2. Розроблення методу врахування індивідуальних характеристик та умов роботи ЛЕП в умовах нечіткості вхідної інформації та відсутності математичних зв'язків між ознаками стану.

3. Моделювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП на інтервалі часу за розробленими методами та функціями.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В [3, 5] наведено статистичні дані щодо кількості випадків виникнення КЗ на лініях 110 (154) кВ у потужній ЕЕС з загальною довжиною ліній 6000 км. Ці аналітичні залежності приведені в графічній формі на рис. 1.

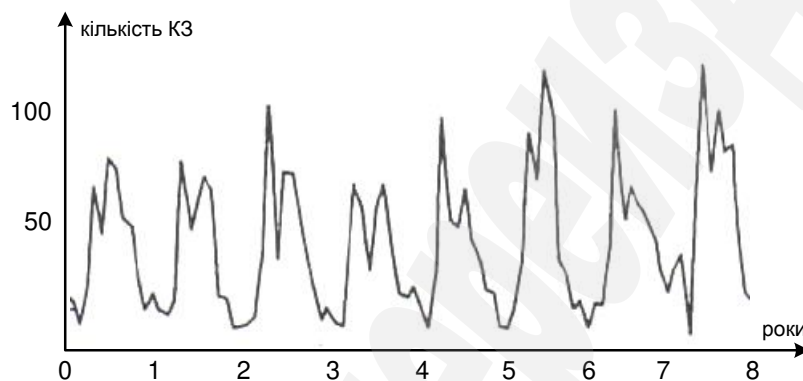


Рис. 1. Розподіл кількості коротких замикань по повітряним лініям 110 (154) кВ у потужній електроенергетичній системі протягом 8 років

В цих роботах також приводяться статистичні дані з розподілу кількості КЗ по місяцях та роках для повітряних ЛЕП 220, 330 кВ. Але, в даних дослідженнях при визначенні імовірності виникнення КЗ на ЛЕП та прогнозуванні рівнів струмів КЗ не враховуються індивідуальні особливості ЛЕП, а саме їхній технічний стан та кваліфікаційний рівень персоналу, що їх обслуговує. Вплив кліматичних умов також здійснено усереднено у помісячній статистиці.

В [6] запропоновані аналітичні методи визначення залишкового ресурсу та імовірності відмови повітряних ЛЕП, які використовують усереднені статистичні параметри, що не враховують індивідуальні умови роботи ЛЕП. Також під «відмовою» розуміється будь-яка відмова ЛЕП без виокремлення КЗ як виду пошкодження.

В [7, 8] авторами запропоновано нечіткій підхід до визначення імовірності відмови ЛЕП, який враховує індивідуальні характеристики, рівень кваліфікації персоналу та метеорологічні умови роботи ЛЕП, але у запропонованому підході також не виокремлюється саме імовірність виникнення КЗ.

В [9, 10] представлено імовірнісну модель для оцінювання ризику відключення лінії та приведено статистику аварій, викликаних погодними умовами, при цьому також не виділено відключення ліній електропередачі через КЗ. В роботах [11, 12] приведені імовірнісні характеристики відмов повітряних ЛЕП в умовах мокрого снігу та ожеледі, але не розглянуті інші фактори, що впливають на надійність роботи повітряних ЛЕП.

З проведеного дослідження літератури можна зробити висновок, що в сучасних системах оцінювання імовірності виникнення КЗ на ЛЕП здебільшого користуються усередненими статистичними даними щодо їхніх пошкоджень. Для достовірного моделювання розвитку аварії в конкретній ЕЕС при виникненні КЗ на її повітряних ЛЕП необхідне розроблення методів, які б враховували їхній індивідуальний стан та умови функціонування.

5. Методи дослідження

За статистичними даними [4, 5] визначається характеристика розподілу КЗ на повітряних ЛЕП 110 (154) кВ на 100 км довжини та відповідна інтегральна функція розподілу імовірності визначення КЗ. Нехай у i -тий місяць на лініях 110 (154) кВ у ЕЕС відбулось N_i коротких замикань. Загальна довжина ЛЕП 110 (154) кВ у ЕЕС складає L кілометрів. В цьому випадку, відносна кількість КЗ у i -тий місяць на 100 км довжини ЛЕП складає:

$$n_i = \frac{N_i \cdot 100}{L}. \quad (1)$$

Функція розподілу виникнення КЗ на 100 км ЛЕП 110 кВ визначається як:

$$f(t_i) = \frac{n_i}{N}, \quad (2)$$

де t_i – інтервал часу, що відповідає i -тому місяцю; N – загальна кількість КЗ. Графік функції $f(t)$, побудований за статистичними даними [4], представлено на рис. 2.

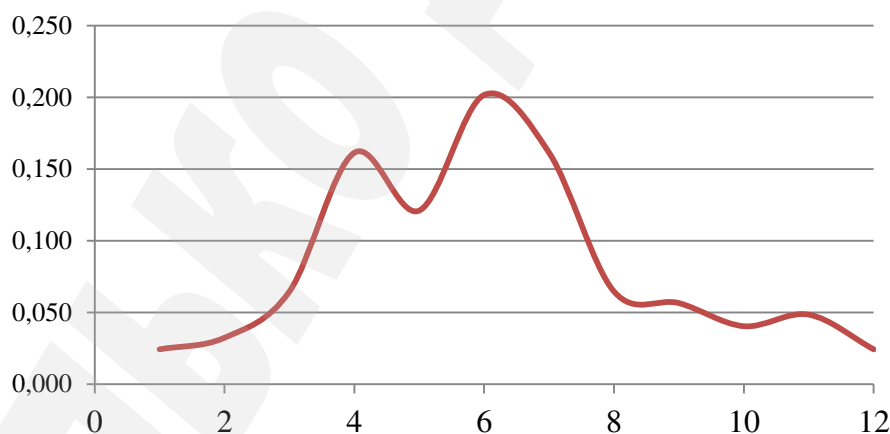


Рис. 2. Залежність $f(t)$ для повітряних ліній електропередачі 110 (154) кВ

Інтегральна функція розподілу виникнення КЗ на 100 км ЛЕП 110 (154) кВ визначається за наступним виразом:

$$F(t_i) = \int_{t=0}^T f(t) \cdot dt. \quad (3)$$

Графік інтегральної функції $F(t)$ представлено на рис. 3.

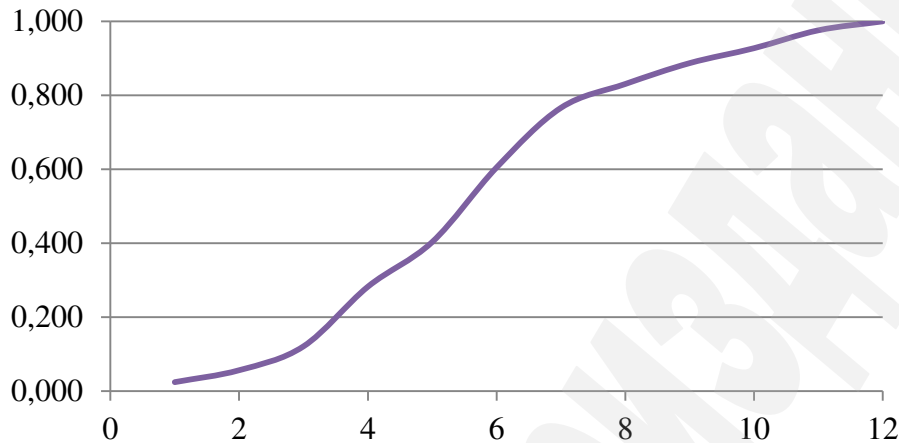


Рис. 3. Інтегральна залежність $F(t)$ для повітряних ліній електропередачі напругою 110 (154) кВ

Для оцінювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП на інтервалі часу введемо наступні події:

H_1 – подія, що означає виникнення КЗ на повітряній ЛЕП довжиною L на інтервалі часу Δt ;

H_2 – подія, що означає відсутність КЗ на повітряній ЛЕП довжиною L на інтервалі часу Δt .

Тоді безумовна імовірність виникнення КЗ на ЛЕП на інтервалі часу Δt визначається безпосередньо з функції $F(t)$:

$$p(H_1) = (F(t_2) - F(t_1)) \cdot \frac{L}{100}. \quad (4)$$

Оскільки події H_1 та H_2 представляють собою повну групу несумісних подій, то:

$$p(H_2) = 1 - p(H_1).$$

Врахування індивідуальних характеристик та умов роботи повітряної ЛЕП. Імовірність виникнення КЗ на інтервалі часу Δt залежить від індивідуальних характеристик та умов роботи ЛЕП, таких як:

- технічний стан ЛЕП в момент часу t_1 ;
- рівень кваліфікації персоналу, в віданні та управлінні якого знаходиться ЛЕП;
- метеорологічні умови на розглядуваному інтервалі часу.

Для оцінки індивідуальних характеристик та умов роботи ЛЕП введемо наступну подію:

B – подія, яка полягає в тому, що на момент часу t_1 повітряна ЛЕП мала певний технічний стан S . Рівень кваліфікації персоналу, що її обслуговує на цей момент часу дорівнює P . А метеорологічні умови на момент часу спостереження визначаються величиною M .

Тоді можна визначити наступні умовні імовірності:

1) $p(B / H_1)$ – умовна імовірність події B при настанні події H_1 (або ймовірність підтвердження гіпотези «КЗ на ЛЕП на інтервалі часу Δt » ознаками S, P, M , які характеризують стан та умови роботи розглядуваної ЛЕП);

2) $p(B / H_2)$ – умовна імовірність події B при настанні події H_2 (або ймовірність підтвердження гіпотези «відсутність КЗ на ЛЕП на інтервалі часу Δt » ознаками S, P, M , які характеризують стан та умови роботи розглядуваної ЛЕП).

В цьому випадку, імовірність виникнення КЗ на інтервалі часу на ЛЕП з урахуванням її стану та умов роботи визначається за формулою Байєса:

$$p(H_1 / B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B / H_1)}{p(H_1) \cdot p(B / H_1) + p(H_2) \cdot p(B / H_2)}. \quad (5)$$

При цьому постає питання визначення умовних імовірностей $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$.

Всі параметри, від яких залежать імовірності $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$, представляють собою нечіткі величини, що не підлягають формалізованому опису. Аналітичні зв'язки між ними також відсутні. За таких вихідних умов для визначення впливу стану та умов роботи ЛЕП на імовірність КЗ доцільно запропонувати нечіткий підхід:

$$p(B / H_1) = \varphi_1(S, P, M); \quad (6)$$

$$p(B / H_2) = \varphi_2(S, P, M). \quad (7)$$

Існує ряд методів нечіткого виводу, які дозволяють отримати достовірний кількісний результат за умови нечіткості вхідних даних. До таких методів відносяться:

- метод Мамдані;
- метод Сугено;
- нечіткий вивід Заде;
- спрощений нечіткий вивід.

Серед перерахованих методів згідно з [2, 7] найменш залежним від якості вхідної інформації та кваліфікації експертів є спрощений нечіткий вивід.

Спрощений метод нечіткого виводу. Алгоритм спрощеного методу нечіткого виводу представлено в [7]. Нехай умовні імовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ можуть знаходитись на одному з п'яти інтервалів:

- P_1 – дуже низька $[0; 0,2)$;
- P_2 – низька $[0,2; 0,36)$;
- P_3 – середня $[0,36; 0,64)$;
- P_4 – висока $[0,64; 0,8)$;
- P_5 – дуже висока $[0,8; 1]$.

Імовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$ характеризуються наступними вхідними ознаками посилок до виникнення КЗ:

- 1) β_1 = «технічний стан ЛЕП»;
- 2) β_2 = «метеорологічні умови»;
- 3) β_3 = «рівень кваліфікації персоналу».

Вхідні ознаки описуються наступними нечіткими термами:

- 1) β_1 = «технічний стан ЛЕП»: β_{11} = «Добрий», β_{12} = «Середній», β_{13} = «Поганий»;
- 2) β_2 = «метеорологічні умови»: β_{21} = «Сприятливі», β_{22} = «Середні», β_{23} = «Несприятливі»;
- 3) β_3 = «рівень кваліфікації персоналу»: β_{31} = «Високий», β_{32} = «Середній», β_{33} = «Низький».

Нечіткі терми визначаються функціями приналежності вихідних величин моделей оцінювання стану повітряної ЛЕП, погодних умов та рівня персоналу.

На основі множини ознак, що впливають на імовірність виникнення КЗ на повітряній ЛЕП β , сформульовані правила нечіткого виводу, які визначають матриці еталонних умовних імовірностей $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$.

Розглянемо детальніше підходи до визначення параметрів, за якими оцінюються імовірності $p(B/H_1)$ та $p(B/H_2)$.

Технічний стан ЛЕП. Технічний стан повітряної ЛЕП визначається за нечіткою моделлю лінії електропередачі [8]. Кількісна оцінка технічного стану представляє собою залишковий ресурс ЛЕП, який змінюється в межах від 0 (ресурс повністю вичерпано) до 1 (повністю нова та справна лінія).

Метеорологічні умови. Метеорологічні умови на розглядуваному інтервалі часу оцінюються за нечіткою моделлю, представленою в [14]. Вихідною кількісною оцінкою є метеорологічна обстановка, яка визначається на інтервалі від 0 (повністю сприятлива) до 1 (повністю несприятлива).

Рівень кваліфікації персоналу. Кваліфікаційний рівень експлуатаційного та оперативного персоналу, що обслуговує розглядувану ЛЕП, залежить від таких факторів, як досвід роботи та рівень підготовки (технічної, психологічної, тощо). За сукупністю цих факторів рівень персоналу можна оцінити як «низький», «середній» та «високий» [14]. Це дозволяє побудувати нечіткі терми для оцінки рівня кваліфікації персоналу на стандартних інтервалах шкали Харрінгтона [15].

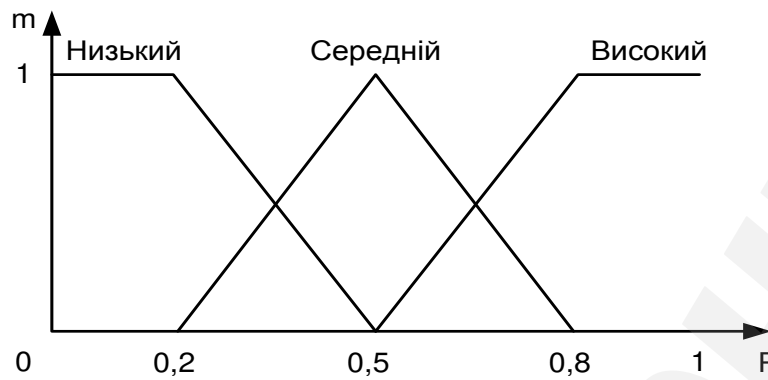


Рис. 4. Нечіткі терми для оцінювання рівня кваліфікації персоналу

Еталонні матриці інтервалів умовних імовірностей $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$ визначаються за оцінками експертів та приведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Еталонні матриці умовної імовірності $p(B / H_1)$

S ₁ – дуже низька			
$\beta_i \backslash \mu(\beta_i)$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	1	1	1
$\mu_2(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0
S ₂ – низька			
$\beta_i \backslash \mu(\beta_i)$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	1	0	1
$\mu_2(\beta_i)$	0	1	0
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0
S ₃ – середня			
$\beta_i \backslash \mu(\beta_i)$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	1	1	1
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0
S ₄ – висока			
$\beta_i \backslash \mu(\beta_i)$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	0	0	1
$\mu_3(\beta_i)$	1	1	0
S ₅ – дуже висока			
$\beta_i \backslash \mu(\beta_i)$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_3(\beta_i)$	1	1	1

Таблиця 2

Еталонні матриці умовної імовірності $p(B / H_2)$

S ₁ – дуже низька			
$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_3(\beta_i)$	1	1	1
S ₂ – низька			
$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	0	1	0
$\mu_3(\beta_i)$	1	0	1
S ₃ – середня			
$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_2(\beta_i)$	1	1	1
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0
S ₄ – висока			
$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	0	1	1
$\mu_2(\beta_i)$	1	0	0
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0
S ₅ – дуже висока			
$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	1	1	1
$\mu_2(\beta_i)$	0	0	0
$\mu_3(\beta_i)$	0	0	0

В результаті визначення ознак вхідних величин сформовано вектори умовних імовірностей $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2) - \beta_{K1} = \{\beta_{1K1}, \beta_{2K1}, \beta_{3K1}\}, \beta_{K2} = \{\beta_{1K2}, \beta_{2K2}, \beta_{3K2}\}$. За функціями приналежності нечітких термів визначаються значення приналежності кожної ознаки її нечітким термам та формуються матриці умовних імовірностей $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$ (табл. 3, 4).

Таблиця 3

Матриця умовної імовірності $p(B / H_1)$

$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	$\mu_1(\beta_{1K1})$	$\mu_1(\beta_{2K1})$	$\mu_1(\beta_{3K1})$
$\mu_2(\beta_i)$	$\mu_2(\beta_{1K1})$	$\mu_2(\beta_{2K1})$	$\mu_2(\beta_{3K1})$
$\mu_3(\beta_i)$	$\mu_3(\beta_{1K1})$	$\mu_3(\beta_{2K1})$	$\mu_3(\beta_{3K1})$

Таблиця 4

Матриця умовної імовірності $p(B / H_2)$

$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_i)$	$\mu_1(\beta_{1K2})$	$\mu_1(\beta_{2K2})$	$\mu_1(\beta_{3K2})$
$\mu_2(\beta_i)$	$\mu_2(\beta_{1K2})$	$\mu_2(\beta_{2K2})$	$\mu_2(\beta_{3K2})$
$\mu_3(\beta_i)$	$\mu_3(\beta_{1K2})$	$\mu_3(\beta_{2K2})$	$\mu_3(\beta_{3K2})$

Для визначення, до якої з еталонних імовірностей належать імовірності $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$, реалізується наступний алгоритм нечіткого висновку:

- 1) виконується операція логічного об'єднання за правилом мінімізації для матриці S_K та кожної з еталонних матриць $S_1 \dots S_5$;
- 2) визначається індекс порівняння I_i , $i=1, \dots, 5$, який визначає близькість матриці S_K до кожної з еталонних матриць $S_1 \dots S_5$:

$$I_i = \frac{\sum_{j=1}^3 \mu_{S_K \cap S_j}(\beta_{iK})}{\sum_{j=1}^3 \mu_{S_j}(\beta_{ij})}; \quad (8)$$

- 3) індекс порівняння з максимальним значенням визначає, до якого з еталонних станів відноситься фактична нечітка імовірність виникнення КЗ:

$$S_K \in S_E = \{S_i | \max I_i\}. \quad (9)$$

Для визначення кількісного значення вихідної змінної $p(B / H_1)$ або $p(B / H_2)$, будемо вважати, що відношення індексу порівняння $I_{\text{вих}}$ до суми максимальних індексів порівняння вихідних термів визначає ступінь довіри до отриманого висновку. За великої кількості індексів порівняння в якості ступеня недовіри слід приймати середньоарифметичне значення від всіх індексів недовіри.

За такого підходу, кількісне значення вихідної змінної S_n визначається за наступними виразами:

$$p(B / H_1) = S_{\text{вих}-n1} + \Delta S_{\text{вих1}} \frac{I_{\text{вих1}}}{\frac{\sum_{k=1}^n I_{1k}}{I_{\text{вих1}} + \frac{k-1}{n}}}, \quad (10)$$

$$p(B / H_2) = S_{\text{вих}-n2} + \Delta S_{\text{вих2}} \frac{I_{\text{вих2}}}{\frac{\sum_{k=1}^n I_{2k}}{I_{\text{вих2}} + \frac{k-1}{n}}}, \quad (11)$$

де $S_{вих-n1}$, $S_{вих-n2}$ – це нижня границя інтервалу вихідного терму, який визначено в якості рішення;

$\Delta S_{вих1} = S_{вих-в1} - S_{вих-n1}$, $\Delta S_{вих2} = S_{вих-в2} - S_{вих-n2}$ – ширина інтервалу вихідного терму, який визначено в якості рішення.

6. Результати досліджень

Розглянемо повітряну ЛЕП 154 кВ Дніпровської електроенергетичної системи (диспетчерська назва: Л10, підстанція «ДніпроГЕС-1» – підстанція «Солонянська», довжина $L=42$ км). Та визначимо імовірність її відмови на інтервалі часу $\Delta t=2$ міс. найбільшої грозової активності (квітень-травень).

За інтегральною функцією розподілу імовірності виникнення КЗ на лініях 110 (154) кВ (рис. 3) визначається безумовна імовірність виникнення КЗ на ЛЕП на інтервалі часу $\Delta t=2$ міс. – $F(t_1)=0,121$, $F(t_2)=0,403$:

$$p(H_1) = (F(t_2) - F(t_1)) \cdot \frac{L}{100} = (0,403 - 0,121) \frac{42}{100} = 0,119; \quad (12)$$

$$p(H_2) = 1 - p(H_1) = 1 - 0,119 = 0,881. \quad (13)$$

Технічний стан повітряної ЛЕП Л10 визначено за нечіткою моделлю, представленою в [8] за наступними параметрами:

- відносне електричне навантаження: $E = 0,9$;
- коефіцієнт дефектності опор: $K_{до} = 0,4$;
- коефіцієнт дефектності ізоляторів: $K_{ди} = 0,2$;
- коефіцієнт дефектності проводів: $K_{дп} = 0,5$.

Технічний стан (залишковий ресурс) лінії Л10 складає:

$$\beta_1 = \varphi_T(E, K_{до}, K_{ди}, K_{дп}) = \varphi_T(0,9; 0,4; 0,2; 0,5) = 0,68. \quad (14)$$

Метеорологічні умови в розглядуваний період описуються наступними кількісними характеристиками:

- середнє вітрове навантаження: $W = 7$ м/с;
- навантаження від ожеледі: $I = 0$ мм;
- відносна інтенсивність грози: $S = 10$ днів/міс;
- середня температура повітря: $T = 12$ °С.

За нечіткою моделлю [13] визначено метеорологічну обстановку в регіоні функціонування повітряної лінії Л10:

$$\beta_2 = \varphi_M(W, I, S, T) = \varphi_M(7; 0; 10; 12) = 0,27. \quad (15)$$

Рівень кваліфікації обслуговуючого персоналу визначається за нечіткими термами, представленими в [13] і складає:

$$\beta_3 = \mu(P) = 0,75. \quad (16)$$

За розробленими еталонними матрицями (табл. 1, 2) формуються матриці умовних імовірностей $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$.

Таблиця 5

Матриця умовної імовірності $p(B / H_1)$ для повітряної лінії електропередачі Л10

$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_1)$	0	0,767	0
$\mu_2(\beta_2)$	0,4	0,233	0,167
$\mu_3(\beta_3)$	0,6	0	0,833

Таблиця 6

Матриця умовної імовірності $p(B / H_2)$ для повітряної лінії електропередачі Л10

$\mu(\beta_i) \backslash \beta_i$	β_1	β_2	β_3
$\mu_1(\beta_1)$	0	0,233	0
$\mu_2(\beta_2)$	0,4	0,767	0,167
$\mu_3(\beta_3)$	0,6	0	0,833

За виразами (8)–(11) визначаються імовірності $p(B / H_1)$ та $p(B / H_2)$, реалізується наступний алгоритм нечіткого висновку:

$$p(B / H_1) = S_{\text{вих}-n1} + \Delta S_{\text{вих1}} \frac{I_{\text{вих1}}}{I_{\text{вих1}} + \frac{\sum_{i=1}^n I_{i1}}{n}} = 0,36 + 0,16 \cdot 0,22 = 0,395; \quad (17)$$

$$p(B / H_2) = S_{\text{вих}-n2} + \Delta S_{\text{вих2}} \frac{I_{\text{вих2}}}{I_{\text{вих2}} + \frac{\sum_{i=1}^n I_{i2}}{n}} = 0,64 + 0,16 \cdot 0,18 = 0,667. \quad (18)$$

За формулою Байєса (5) визначається імовірність виникнення КЗ на повітряній ЛЕП 154 кВ Л10 Дніпровської ЕЕС протягом $\Delta t = 2$ міс.:

$$p(H_1 / B) = \frac{p(H_1) \cdot p(B / H_1)}{p(H_1) \cdot p(B / H_1) + p(H_2) \cdot p(B / H_2)} =$$

$$= \frac{0,119 \cdot 0,395}{0,119 \cdot 0,395 + 0,881 \cdot 0,675} = 0,073. \quad (19)$$

Отриманий результат показує, що імовірність виникнення КЗ на лінії Л10 в період грозової активності нижча за середньостатистичну через добрий технічний стан та високий рівень обслуговуючого персоналу.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. У порівнянні з попередніми методами та моделями оцінки імовірності виникнення КЗ на повітряних ЛЕП розроблений підхід дозволяє враховувати об'єктивно існуючі індивідуальні особливості роботи окремо взятої ЛЕП. Це дозволить ефективно використати підхід у задачах оцінювання ризику розвитку аварійної ситуації в ЕЕС при виникненні в ній КЗ.

Weakness. Недоліком запропонованого підходу є складність його використання та низька достовірність кінцевого результату в разі відсутності репрезентативної статистичної інформації щодо КЗ на розглядуваному обладнанні або відсутності експертів достатньої кваліфікації, спроможних обґрунтовано побудувати функції приналежності нечітких термів та еталонні матриці.

Opportunities. Використання розробленого підходу в задачах ризик-орієнтованого управління ЕЕС дасть можливість приймати ефективні рішення по зниженню ризику розвитку аварії в ЕЕС в умовах неповноти вхідної інформації та підвищити надійність її роботи.

Threats. Застосування запропонованого підходу в умовах низької кваліфікації експертів може призвести до помилкових рішень та дій при здійсненні ризик-орієнтованого управління ЕЕС.

8. Висновки

1. Визначено інтегральні функції розподілу імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП, що дає можливість сформулювати генеральну сукупність подій для ЛЕП різних класів напруги. А також визначити безумовні імовірності виникнення та відсутності КЗ на ЛЕП на інтервалі часу.

2. Розроблено метод оцінювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП на інтервалі часу, який враховує статистичну інформацію щодо функціонування ЛЕП певного класу напруги, враховує їхню довжину, технічний стан, умови функціонування та рівень обслуговуючого персоналу. Цей метод дозволяє врахувати невизначеності, пов'язані з відсутністю аналітичних залежностей між ознаками, що впливають на імовірність виникнення КЗ на ЛЕП та якісним характером ряду ознак.

3. Проведено моделювання імовірності виникнення КЗ на повітряній ЛЕП на інтервалі часу за розробленими методами та функціями. Отриманий результат дозволяє виділити імовірність відмови ЛЕП через виникнення КЗ з

загальної множини відмов ЛЕП та виконати оцінку ризику виникнення КЗ на ЛЕП. За даною оцінкою можна розробити заходи по зниженню величини ризику (наприклад, покращення технічного стану шляхом заміни та модернізації обладнання ЛЕП, підвищення рівня обслуговуючого персоналу, тощо) та розвитку аварійної ситуації в ЕЕС.

References

1. Kosterev, M., Litvinov, V. (2018). Priority events determination for the risk-oriented management of electric power system. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 21–32. doi: <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00643>
2. Handschin, E., Jurgens, I., Neumann, C. (2008). Long term optimization for risk-oriented asset management. *16th Power Systems Computation Conference*. Glasgow.
3. Neklepaev, B., Vostrosablin, A. (1999). Veroiatnostnye kharakteristiki korotkikh zamykaniy v energosistemakh. *Elektrichestvo*, 8, 15–23.
4. Sitnikov, V., Skopincev, V. (2007). Veroiatnostno-statisticheskii podkhod k ocenke resursov elektrosetevogo oborudovaniia v processe ekspluatatsii. *Elektrichestvo*, 11, 9–15.
5. Neklepaev, B., Vostrosablin, A. (1994). Statisticheskaiia veroiatnost vozniknoveniia korotkikh zamykaniy v energosistemakh. *Elektricheskie stancii*, 7, 51–54.
6. Nazarychev, A., Andreev, D. (2005). *Metody i matematicheskie modeli kompleksnoi ocenki tekhnicheskogo sostoiianiia elektrooborudovaniia*. Ivanovo: IGEU, 224.
7. Kosteriev, M., Bardyk, Ye. (2011). *Pytannia pobudovy nechitkykh modelei otsinky tekhnichnoho stanu ob'ektiv elektrychnykh system*. Kyiv: NTUU «KPI», 148.
8. Kosteriev, M., Bardyk, Ye., Vozhakov, R. (2011). Nechitke modeliuvannia LEP dlia otsinky ryzyku znyzhennia nadiinosti elektropostachannia. *Visnyk VPI*, 6, 159–163.
9. Ciapessoni, E., Cirio, D., Gagleoti, E. (2008). A probabilistic approach for operational risk assessment of power systems. *CIGRE*, C4–114.
10. Ciapessoni, E., Cirio, D., Kjolle, G., Massucco, S., Pitto, A., Sfora, M. (2016). Probabilistic Risk-Based Security Assessment of Power Systems Considering Incumbent Threats and Uncertainties. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7 (6), 2890–2903. doi: <http://doi.org/10.1109/tsg.2016.2519239>
11. Bonelli, P., Lacavalla, M., Marcacci, P., Mariani, G., Stella, G. (2011). Wet snow hazard for power lines: a forecast and alert system applied in Italy. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11 (9), 2419–2431. doi: <http://doi.org/10.5194/nhess-11-2419-2011>
12. Lacavalla, M., Marcacci, P., Frigerio, A. (2015). Forecasting and monitoring wet snow sleeve on overhead power lines in Italy. *IEEE Workshop on Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems Proceedings*, 78–83. doi: <http://doi.org/10.1109/eesms.2015.7175856>

13. Kosteriev, M., Litvinov, V. (2019). Otsiniuvannia rivnia prypustymoho ryzyku vynyknennia avariinoi sytuatsii v elektroenerhetychnii systemi za dopomohoiu nechitkykh modelei. *Elektrotekhnika ta elektroenerhetyka*, 2, 43–50.
14. Remennikov, V. (2005). *Upravlencheskie resheniia*. Minsk: Iuniti, 144.
15. Hines, P., Blumsack, S., Sanchez, E., Barrows, C. (2010). The topological and electrical structure of power grids. *Proceeds of 43rd Hawaii International Science Conference*. Honolulu, 1–10. doi: <http://doi.org/10.1109/hicss.2010.398>

The object of research is the probabilistic characteristics of the occurrence of a short circuit (SC) on overhead electric transmission lines (ETL) of voltage classes 110 kV and higher, the failure of which can lead to the development of an accident in the electric power system (EPS). The probabilistic characteristics of the SC occurrence on ETL depend on a large number of factors: the length and route of transmission of power lines, voltage class, weather conditions, and the qualifications of the staff in which charge, management and maintenance the power lines are located. The most problematic issues in assessing the SC occurrence on overhead power lines is the allocation of damage from a SC with general damage statistics, the quantitative consideration of such features of the functioning of overhead ETLs, such as meteorological conditions, the staff qualification level and the technical condition of a single piece of equipment.

In the course of the study, a fuzzy-statistical approach is developed to assess the SC occurrence on an overhead power line taking into account its individual characteristics of work, such as the staff qualification level, meteorological conditions of operation and the technical condition of the power line. To determine the unconditional probability of SC occurrence on an overhead ETL, statistical data on SC on lines of the corresponding voltage class are used. The technical condition of the power lines and meteorological conditions of operation are quantified by fuzzy models, the staff qualification level is determined at standard intervals of the Harrington scale. Conditional probabilities of the state of functioning of power lines are determined using a simplified fuzzy conclusion, which makes it possible to quantify the conditional probability in the absence of clear analytical relationships between the signs of the conditions of power lines.

The results obtained by the developed approach are recommended to be used in the goals of risk-oriented management of the EPS to increase the reliability of operation by reducing the risk of developing a system accident when a SC occurs in the EPS elements. Also, restrictions on the application of the developed approach to the problems of assessing the probability of equipment failure and the organization of risk-based management are identified.

Keywords: *short circuit, power line, technical condition, staff qualification level, meteorological conditions, membership functions, reference matrices.*