

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОМУТАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ОЦІНКИ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ ПРИ ВІДМОВАХ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

На сьогоднішній день в електроенергетиці України особливо важливими є питання оцінки ризику експлуатації ЕЕС внаслідок відмов електрообладнання, пов'язаних перш за все зі значним рівнем його старіння і низькими темпами заміни, а також з можливим одночасним аварійним виведенням з експлуатації декількох елементів внаслідок терористичних атак.

Для оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС при відмовах електрообладнання пропонується лінгвістична модель визначення загального спрацьованого ресурсу та імовірності відмови елегазових високовольтних вимикачів різних типів на основі агрегування інформації щодо технічного стану окремих функціональних вузлів. Запропоновано підхід для врахування значущості окремих елементів вимикача в частині впливу на загальний спрацьований ресурс ваговими коефіцієнтами, які визначаються на основі статистики по відмовам.

Результатом визначення загального спрацьованого ресурсу є можливість оцінки імовірності його відмови на інтервалі часу спостереження. Налаштування і адаптація розробленої лінгвістичної моделі елегазового вимикача до реальних умов експлуатації забезпечується корегуванням параметрів функцій належності термів вхідних лінгвістичних змінних з використанням вагових коефіцієнтів і нечіткого логічного висновку із середньозваженою істинністю.

Розроблена лінгвістична математична модель оцінки технічного стану та імовірності відмови елегазових вимикачів може бути використана як складова комплексу програм аналізу ризиків в ЕЕС та формування превентивних дій щодо забезпечення експлуатаційної надійності електрообладнання і режимної надійності ЕЕС при аварійних відмовах обладнання.

Ключові слова: нечітка логіка, вимикач, ресурс, ризик, відмова, технічний стан.

Вступ. Наразі з розвитком ринкових відносин в електроенергетиці України загострюється проблема забезпечення режимної надійності сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС). Реформування електроенергетики, поява самостійних генеруючих мережевих збутових компаній виключила важливу територіальну відповідальність за надійність. Це призвело до зниження рівня і ускладнило проблему забезпечення надійності ЕЕС і електропостачання споживачів.

Суттєвий вплив на надійність енергетики України в сучасних умовах визначають також наступні основні фактори: зростання зносу основних фондів в електроенергетиці (більш 50-60 %) і низькі темпи його заміни; почастишали несприятливі метеорологічні умови (грози, сильні вітри, ожеледь); практична відсутність приросту генеруючої потужності і об'єктів електричних мереж; невідповідність методологічної і нормативно-правової бази забезпечення надійності темпам реорганізації галузі і впровадження ринку; різким підвищенням вірогідності зовнішніх терористичних атак.

Для прийняття ефективних рішень щодо стратегії управління режимами ЕЕС в останні десятиріччя в промислово розвинених країнах використовують стратегію ризик-менеджменту [1, 2] де в якості характеристики режимної надійності ЕЕС часто використовують показник ризику [1-4].

Основними складовими ризику, які використовуються в оцінці режимної надійності є відмови електрообладнання, коротке замикання (КЗ) на повітряних лініях електропередачі, режим ЕЕС на момент відмови, збитки внаслідок виникнення аварійної ситуації і інше. Проведений аналіз [1, 3, 5] показав, що для визначення основних складових ризику можливо тільки на основі застосування імовірнісних методів та експертних оцінювань.

Значна частка (близько 90 %) аварій, які виникають у сучасних ЕЕС, припадає на аварії в електричних мережах [5, 6]. Функції локалізації аварій на електричних станціях та підстанціях виконують насамперед високовольтні вимикачі, від надійності функціонування яких значною мірою залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів. Частка високовольтних вимикачів у загальній пошкодженості електрообладнання на сьогоднішній день складає від 30 до 40 % [5, 7].

При формуванні стратегії керування парком вимикачів енергетичним компаніям необхідно враховувати ризик виникнення аварійної ситуації в ЕЕС при відмовах вимикачів та приймати обґрунтовані

рішення щодо ремонту або заміни вимикачів в умовах обмежених інвестицій [5, 8]. Вирішення даних задач потребує розробки методів, адекватних математичних моделей оцінки технічного стану (ТС) та спрацьованого і залишкового ресурсу високовольтних вимикачів різних типів.

Задачі оцінки ТС, визначення спрацьованого ресурсу та імовірності відмови електрообладнання і високовольтних вимикачів в ЕЕС розглядалися в низці робіт [8-12]. Дуже часто оцінка ТС високовольтних вимикачів виконується на основі тільки кількісної оцінки його спрацьованого комутаційного ресурсу [13] з використанням залежності допустимої кількості відключень від величини струмів КЗ, що дає можливість врахувати індивідуальні характеристики конкретного вимикача та параметри електричної мережі, де він встановлений.

Разом з тим на основі використання даного підходу достовірну оцінку спрацьованого комутаційного ресурсу високовольтного вимикача можна виконати тільки за наявності ретроспективних даних щодо відключень вимикачем струмів КЗ певної величини на протязі всього терміну експлуатації. Реальна практика показує, що отримати такі дані не завжди є можливим.

Аналіз статистичних даних по відмовам окремих функціональних вузлів високовольтних вимикачів показує, що для оцінки їх залишкового ресурсу розглядати тільки ТС його комутаційного вузла недостатньо, оскільки значний відсоток відмов припадає на механічний вузол і інші складові.

В [5] оцінка ресурсу працездатності вимикача визначають на основі визначення ТС його основних вузлів, врахуванні значень параметрів, що відносяться як до контактів так і до механічної системи. В [14] представлена модель комплексної оцінки ТС вимикача, що побудована на основі нечіткої логіки, яка ґрунтується на агрегуванні показників ТС окремих функціональних вузлів і дозволяє визначати загальний спрацьований ресурс як результат оцінки тільки спрацьованого механічного і комутаційного ресурсів, але не дозволяє визначити імовірність його відмови на інтервалі часу.

Математична модель оцінки ризику відмови електрообладнання і, зокрема повітряного вимикача на основі врахування ТС дугогасної системи, приводу, ізоляторів, пневмосистеми, та рівня відновлення ресурсу після ремонту наведена в [15].

Розглянуті методи та моделі переважно орієнтуються на використанні окремих параметрів, які можуть бути отримані тільки при відключенні вимикачів, часто потребують для оцінки і прогнозування ТС конкретних вимикачів узагальнених статистичних даних, які не враховують індивідуальні характеристики вимикача.

Мета та завдання досліджень. Метою даного дослідження є розробка комплексної математичної моделі елегазового вимикача для визначення загального спрацьованого ресурсу та імовірності його відмови. При цьому необхідно вирішити наступні задачі: проаналізувати умови функціонування високовольтних вимикачів в сучасних ЕЕС; сформулювати вхідні і вихідні лінгвістичні змінні параметрів ТС моделі елегазового вимикача; розробити нечітку базу знань лінгвістичної моделі оцінки ТС елегазового вимикача; розробити підхід і побудувати алгоритм оцінки ступеню значущості функціональних вузлів елегазового вимикача в частині впливу на загальний спрацьований ресурс; провести тестове дослідження нечіткої моделі оцінки ТС елегазового вимикача та оцінити ризик порушення динамічної стійкості ЕЕС при відмовах елегазових вимикачів.

Матеріал і результати досліджень. Метод і математична модель оцінки ТС елегазового вимикача. Математична модель елегазового вимикача для визначення загального спрацьованого ресурсу повинна задовольняти наступним вимогам [5, 16-18]: використання доступної інформації, яку можна вимірювати або спостерігати переважно без відключення вимикача; модель повинна бути відкритою для можливості використання додаткової вхідної інформації при більш детальному аналізі ТС вимикача; давати можливість використання як кількісної так і якісної вхідної інформації.

Більшість існуючих традиційних моделей оцінки ТС і визначення ресурсу вимикачів не дають можливості здійснити комплексну оцінку їх ТС внаслідок складності одержання детермінованої математичної залежності між параметрами окремих функціональних вузлів та інтегральними показниками ресурсу працездатності. Крім того, інформація щодо відключення струмів КЗ та загальної кількості комутацій виконаних вимикачем, об'єктивно має значний рівень неповноти і нечіткості. Тому завдання комплексної оцінки ТС високовольтних вимикачів належить до категорії погано формалізованих і слабо структурованих задач.

Подолання вищезначених труднощів можливо шляхом побудови математичної моделі вимикача на основі нечіткої логіки, яка дозволяє подати в єдиній формі різномірну інформацію про об'єкт, включаючи і суб'єктивну інформацію експертів та сформулювати більш гнучкий механізм оцінки ТС вимикача [5]. Керуючись основними принципами побудови і у відповідності із загальною структурою нечіткої моделі [5, 19, 20] об'єкта, введемо наступні компоненти нечіткої моделі для оцінки спрацьованого ресурсу елегазового вимикача.

В якості вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі елегазового вимикача використано такі:

R_M – спрацьований механічний ресурс (кількість циклів включення-відключення) з термами:

T_{LI} , T_{M1} , T_{B1} – «Малий», «Середній», «Великий» відповідно.

R_K – спрацьований комутаційний ресурс (кількість відключень струмів КЗ певної величини) з термами: T_{L2} , T_{M2} , T_{B2} – «Малий», «Середній», «Великий» відповідно.
 P_E – тиск дугогасного середовища з термами: T_{L3} , T_{M3} , T_{B3} – «Малий», «Середній», «Великий» відповідно.
 R_{IZ} – стан ізоляторів (активний опір ізоляції) з термами: T_{L4} , T_{M4} , T_{B4} – «Малий», «Середній», «Великий» відповідно.

В якості вихідної лінгвістичної змінної S прийнято «Загальний спрацьований ресурс вимикача». Терми вихідної змінної та їх функції належності прийняті згідно зі стандартним п'ятирівневим 01-класифікатором [19, 20]: T_{VL5} – дуже низький спрацьований ресурс (0; 0.2); T_{L5} – низький спрацьований ресурс (0.2; 0.4); T_{M5} – середній спрацьований ресурс (0.4; 0.6); T_{B5} – високий спрацьований ресурс (0.6; 0.8); T_{VB5} – дуже високий спрацьований ресурс (0.8; 1).

Графіки функцій належності вихідної лінгвістичної змінної «Загальний спрацьований ресурс» наведено на рис. 1.

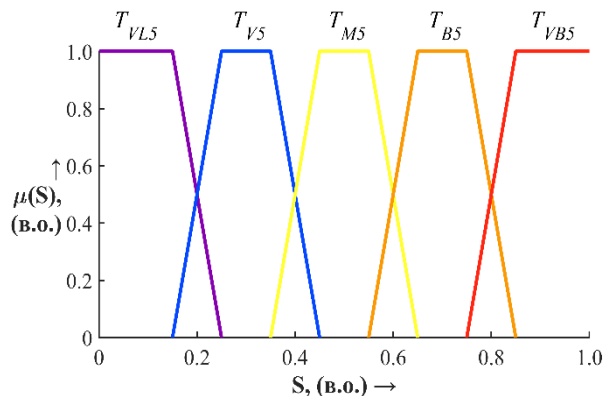


Рисунок 1 – Система трапецій функцій належності вихідної лінгвістичної змінної «Загальний спрацьований ресурс»

Побудована на основі використання вищезазначених підходів база знань нечіткої моделі визначення загального спрацьованого ресурсу елегазового вимикача містить 81 продукційне правило і наведена в табл. 1.

Достовірність результатів, отриманих за нечіткою моделлю діагностування технічного стану елегазового вимикача суттєво залежить від параметрів функцій належності вхідних і вихідних лінгвістичних змінних, оптимальні значення яких визначаються на основі налаштування моделі з використанням репрезентативних експлуатаційних даних.

Таблиця 1. Правила бази знань для визначення ресурсу S елегазового вимикача

$R_M = T_{L1}, R_K = T_{L2}$				$R_M = T_{L1}, R_K = T_{M2}$				$R_M = T_{L1}, R_K = T_{B2}$			
P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
T_{L4}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L5}	T_{L4}	T_{M5}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
T_{M4}	T_{M5}	T_{L5}	T_{VL5}	T_{M4}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L5}	T_{M4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L5}
T_{B4}	T_{L5}	T_{VL5}	T_{VL5}	T_{B4}	T_{M5}	T_{L5}	T_{L5}	T_{B4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L5}
$R_M = T_{M1}, R_K = T_{L2}$				$R_M = T_{M1}, R_K = T_{M2}$				$R_M = T_{M1}, R_K = T_{B2}$			
P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}	R_{IZ}	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
T_{L4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L5}	T_{L4}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L4}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{B5}
T_{M4}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L5}	T_{M4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L5}	T_{M4}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}
T_{B4}	T_{L5}	T_{L5}	T_{VL5}	T_{B4}	T_{M5}	T_{L5}	T_{L5}	T_{B4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}

Продовження таблиці 1

$R_M = T_{B1}, R_K = T_{L2}$			
P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
R_{IZ}			
T_{L4}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}
T_{M4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{L5}
T_{B4}	T_{M5}	T_{M5}	T_{L5}

$R_M = T_{B1}, R_K = T_{M2}$			
P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
R_{IZ}			
T_{L4}	T_{B5}	T_{B5}	T_{M5}
T_{M4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{M5}
T_{B4}	T_{M5}	T_{L5}	T_{M5}

$R_M = T_{B1}, R_K = T_{B2}$			
P_E	T_{L3}	T_{M3}	T_{B3}
R_{IZ}			
T_{L4}	T_{VB5}	T_{VB5}	T_{B5}
T_{M4}	T_{VB5}	T_{B5}	T_{M5}
T_{B4}	T_{B5}	T_{M5}	T_{B5}

Реально на практиці дуже рідко вдається одержати експлуатаційні статистичні дані щодо функціонування електрообладнання. Особливо це стосується елегазових високовольтних вимикачів, які відносно недавно почали масово вводитись в експлуатацію в сучасних ЕЕС і відносно яких не накопичено достатньо статистичної інформації щодо змінення ТС та параметрів надійності. Відсутність на сьогоднішній день представницької інформації, з використанням якої можливо було б визначити загальний спрацьований ресурс вимикача на основі параметрів технічного стану окремих функціональних вузлів, потребує застосування відповідних експертних методів які ґрунтуються на використанні експертних оцінок груп спеціалістів. Це дозволяє швидко отримати кінцеві результати за мінімальних витрат [5].

Актуальною задачею також є створення бази даних функцій належності нечітких моделей однотипних елегазових вимикачів, які можна використати для конкретної одиниці обладнання в умовах неповноти інформації щодо технічного стану.

З використанням результатів експертних оцінок експлуатаційного персоналу, який має досвід експлуатації вимикачів даного типу, НЕК «Укренерго», ДТЕК «Київські електромережі», були сформовані базові форми і визначенні параметри функцій належності вхідних лінгвістичних змінних (рис. 2).

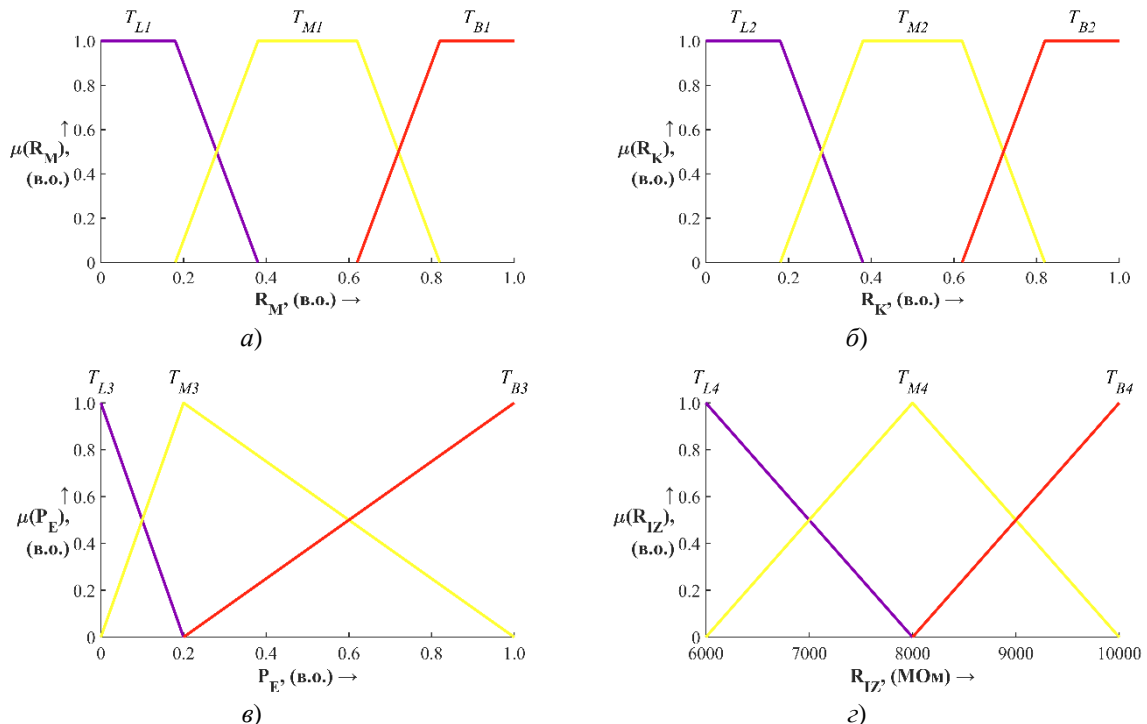


Рисунок 2 – Функції належності термів вхідних лінгвістичних змінних:

- а – «Спрацьований механічний ресурс вимикача»; б – «Спрацьований комутаційний ресурс вимикача»;
- в – «Тиск дугогасного середовища»; г – «Опір ізоляції ізолятора вимикача»

Для знаходження узагальненої оцінки технічного стану вимикача, а саме загального спрацьованого ресурсу вимикача з урахуванням об'єктивної існуючої невизначеності застосовано систему нечіткого логічного висновку (НЛВ) на основі методу Мамдані.

При цьому результуюче значення виходу визначається за допомогою дефазифікації вихідної нечіткої змінної шляхом знаходження зваженого середнього значення (центру ваги).

$$S = \frac{\sum_{j=1}^m \mu^j(S) \cdot S_j}{\sum_{j=1}^m \mu^j(S)}, \quad (1)$$

де S_j – центральні значення вихідної змінної S відповідних термів; $\mu^j(S)$ – усічені функції належності термів вихідної величини S .

Відсутність репрезентативних статистичних даних, які дають можливість встановити відповідність між рівнем спрацьованого ресурсу і зміненням параметрів технічного стану елегазових вимикачів і неможливість в зв'язку з цим виконати налаштування нечіткої моделі, потребує застосування дещо інших підходів. Запропонований підхід базується на оцінці ступеня значущості кожного функціонального вузла в частині внеску в загальну пошкодженість об'єкта, що визначається за статистикою пошкодженості окремих вузлів. Це дає можливість адаптувати розроблену лінгвістичну модель до реальних умов експлуатації з урахуванням рівня значущості вузлів.

Вагові коефіцієнти, які визначають значущість вузла оцінюються за формулою:

$$w_j = \frac{n_i}{n_\Sigma}, \quad (2)$$

де n_i і $n_\Sigma = \sum_{k=1}^m n_k$ – число відмов i -того вузла і загальна кількість відмов генеральної сукупності вимикачів даного типу; m – кількість вузлів.

Отримані вагові коефіцієнти є нормованими і їх використано як корегувальні множники в системі НЛВ Мамдані, в класичному варіанті якої застосовують єдині однакові вагові коефіцієнти для кожного правила передумов. Це дає можливість опосередковано виконати налаштування (корегування, уточнення) лінгвістичної моделі в умовах відсутності репрезентативної інформації.

Існують різні підходи щодо врахування ступеню значущості функціональних вузлів вимикача в системі НЛВ Мамдані. За одним із варіантів [21] застосування даного методу (система НЛВ зі зваженою істинністю) ступінь істинності кожної передумови μ^j , що відповідає термам лінгвістичних змінних параметрів технічного стану функціональних вузлів T_{R_M} , T_{R_K} , T_{P_E} , $T_{R_{IZ}}$, відповідне правило $Rule_j$ помножується на відповідний коефіцієнт w_j . В даному випадку ступінь виконання α_j правила $Rule_j$ при використанні системи НЛВ буде визначатися наступним чином:

$$\alpha_j = \min(w_M \cdot \mu_M^j(R_M), w_K \cdot \mu_K^j(R_K), w_E \cdot \mu_E^j(P_E), w_{IZ} \cdot \mu_{IZ}^j(R_{IZ})). \quad (3)$$

Більш доцільним в процедурі композиції (3) є застосування іншого варіанту запропонованого методу шляхом визначення зваженої суми значень оцінок, тобто лінійної комбінації значень оцінок за всіма критеріями та їхніх вагових коефіцієнтів. У відповідності з цим підходом ступінь виконання α_j правила $Rule_j$ при застосуванні системи НЛВ буде визначатись наступним чином:

$$\alpha_j = w_M \cdot \mu_M^j(R_M) + w_K \cdot \mu_K^j(R_K) + w_E \cdot \mu_E^j(P_E) + w_{IZ} \cdot \mu_{IZ}^j(R_{IZ}). \quad (4)$$

Визначення імовірності відмови вимикача на інтервалі часу спостереження. Однією з найбільш важливих складових, які визначають кількісні показники ризику складних ЕЕС, що визначаються методами статистичного моделювання є імовірність відмови електрообладнання. В роботах [5, 15, 22] запропоновано низку методів визначення імовірності відмови об'єкта, які ґрунтуються на використанні функції розподілу імовірності відмови $F(t)$, яка формується на основі статистики відмов даного типу і класу напруги електрообладнання і модифікується з урахуванням індивідуальних характеристик об'єкта [22]. В умовах відсутності достатньої статистики по відмовам елегазових вимикачів в якості параметра конкретної одиниці обладнання (вимикача), який визначає імовірність його відмови, використано інтегральний показник технічного стану, а саме, загальний спрацьований ресурс S [5, 21]. Імовірність відмови вимикача в даному випадку визначається:

$$F_\Phi(t) = 1 - e^{-\lambda_\Phi t}, \quad (5)$$

де $\lambda_\Phi = S_c^\Phi / t_1$ – інтенсивність відмови вимикача, яка залежить від фактично спрацьованого ресурсу S_c^Φ на момент спостереження t_1 .

Результати лінгвістичного моделювання технічного стану елегазового вимикача для визначення спрацьованого ресурсу та імовірності відмови. Для тестування математичної моделі визначення спрацьованого ресурсу розглядалися високовольтні елегазові вимикачі, встановлені в низці

енергетичних компаній, які були введені в експлуатацію починаючи з 2005 року. В якості вхідних параметрів для нечіткої моделі використовувалась кількість циклів включення-відключення, кількість відключень КЗ зі значенням струмів КЗ певної величини, тиск дугогасного середовища та опір ізоляторів.

Для визначення спрацьованого комутаційного ресурсу вимикача на момент спостереження використовувались ресурсні характеристики, які задаються заводом-виробником для деяких типів вимикачів у вигляді кривих залежностей допустимого числа відключень від струму або отримані відповідні аналітичні залежності. Для вимикачів в яких ресурсна характеристика задана заводом-виробником у вигляді декількох чисел, які являють собою граничну кількість можливих операцій відключень різних значень струмів виконувалась їх апроксимація експоненціальними, гіперболічними функціями, поліномами третього і четвертого ступеня, інтерполяційними сплайнами.

Вихідні дані та результати розрахунку загального спрацьованого ресурсу та імовірності відмови на інтервалі часу спостереження 6 місяців елегазових та повітряних вимикачів за різними схемами нечіткого логічного висновку Мамдані наведено в табл. 2-7.

Приклад виконання правил в системі нечіткого логічного висновку з середньозваженою істинністю для правил (табл. 1) показано на рис. 3.

Таблиця 2. Вихідні дані елегазові вимикачі

№	Назва	Рік встановлення	Місце встановлення	Механічний ресурс, раз	Комутаційний ресурс, раз	
					При $I_{ном.}$	При $I_{відкл. ном.}$
1	LTV-420E2-40/4000	2005	L2-3	10000	2000	18
2	3AP2 FI 420-40/4000	2010	L5-24	10000	3000	12
3	LTV-420E2-40/4000	2012	L9-15	10000	2000	18
4	GL 315-50/4000	2010	L3-4	10000	1400	8
5	HPL-420B2-40/4000	2012	L9-19	10000	2000	18

Таблиця 3. Вихідні дані повітряні вимикачі

№	Назва	Рік встановлення	Місце встановлення	Механічний ресурс, раз	Комутаційний ресурс, раз	
					При $I_{ном.}$	При $I_{відкл. ном.}$
1	BB-330Б-15/2000	1992	L24-26	1000	250	8
2	BHB-330-40/3150	1995	L7-18	1000	300	10
3	BHB-330-40/3150	1994	L2-7	1000	300	10
4	BVB-330-15/2000	1992	L18-26-1	1000	250	8
5	BB-330Б-31.5/2000	1993	L18-19	1000	250	8

Таблиця 4. Результати розрахунку ресурсу елегазового вимикача

№	R_M , в.о.	R_K , в.о.	P_E , в.о.	R_{IZ} , МОМ	Вагові коефіцієнти				Спрацьований ресурс, в.о.		
					w_M , в.о.	w_K , в.о.	w_E , в.о.	w_{IZ} , в.о.	Метод 1	Метод 2	Метод 3
1	0.074	0.082	0.920	9680	0.44	0.17	0.14	0.25	0.161	0.132	0.134
	0.075	0.132	0.931	9724	0.39	0.17	0.15	0.29	0.160	0.138	0.140
	0.074	0.123	0.904	9616	0.41	0.15	0.16	0.28	0.160	0.135	0.137
2	0.057	0.111	0.954	9814	0.45	0.14	0.19	0.22	0.159	0.134	0.133
	0.057	0.089	0.952	9808	0.43	0.17	0.21	0.19	0.159	0.130	0.130
	0.057	0.091	0.945	9780	0.41	0.15	0.17	0.27	0.159	0.135	0.136
3	0.044	0.049	0.956	9824	0.46	0.12	0.14	0.28	0.159	0.128	0.128
	0.044	0.072	0.959	9836	0.49	0.17	0.13	0.21	0.161	0.128	0.129
	0.044	0.051	0.961	9844	0.41	0.15	0.17	0.27	0.161	0.129	0.129
4	0.053	0.293	0.966	9864	0.43	0.18	0.15	0.24	0.250	0.242	0.237
	0.052	0.311	0.959	9836	0.42	0.17	0.15	0.26	0.252	0.250	0.250
	0.053	0.312	0.946	9784	0.39	0.19	0.18	0.24	0.252	0.249	0.251
5	0.044	0.099	0.979	9916	0.41	0.14	0.20	0.25	0.157	0.133	0.131
	0.043	0.089	0.987	9948	0.39	0.13	0.19	0.29	0.156	0.133	0.129
	0.044	0.098	0.962	9849	0.46	0.16	0.13	0.25	0.160	0.129	0.130

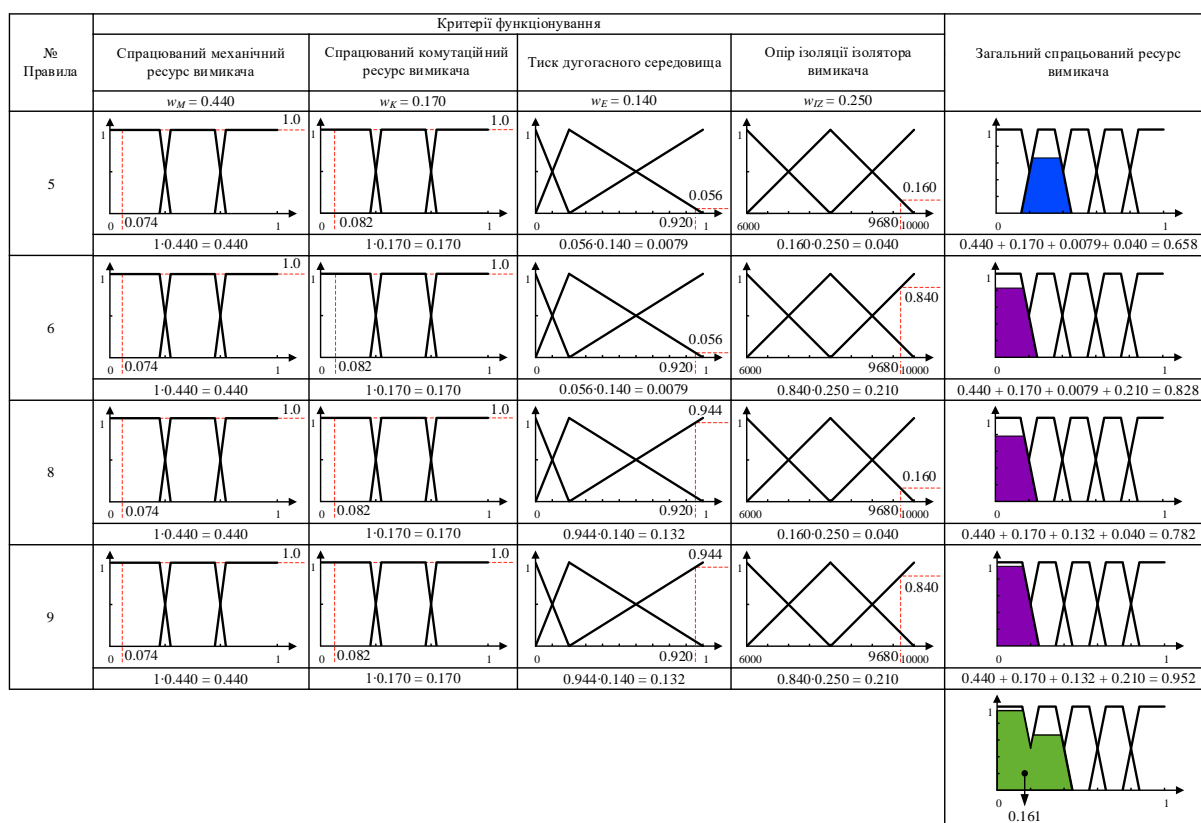


Рисунок 3 – Процедура визначення значень істинності передумов та ступеню виконання для правил

Таблиця 5. Результати розрахунку ресурсу повітряного вимикача

№		R_M , в.о.	R_K , в.о.	P , в.о.	is , в.о.	Вагові коефіцієнти				Спрацьований ресурс, в.о.		
						w_M , в.о.	w_K , в.о.	w_P , в.о.	w_{is} , в.о.	Метод 1	Метод 2	Метод 3
1		0.583	0.776	0.97	0.27	0.20	0.29	0.14	0.37	0.770	0.762	0.758
		0.567	0.741	0.96	0.25	0.18	0.27	0.15	0.40	0.768	0.764	0.751
		0.585	0.772	0.98	0.25	0.21	0.28	0.14	0.37	0.768	0.753	0.752
2		0.572	0.720	0.96	0.21	0.19	0.27	0.14	0.40	0.765	0.752	0.740
		0.577	0.746	0.96	0.23	0.22	0.28	0.16	0.34	0.769	0.756	0.748
		0.563	0.729	0.95	0.21	0.18	0.27	0.15	0.40	0.766	0.757	0.746
3		0.578	0.708	0.98	0.25	0.20	0.28	0.15	0.37	0.765	0.748	0.736
		0.570	0.740	0.97	0.24	0.21	0.31	0.14	0.34	0.768	0.756	0.746
		0.596	0.723	0.97	0.25	0.22	0.28	0.16	0.34	0.767	0.755	0.743
4		0.563	0.792	0.97	0.26	0.17	0.27	0.16	0.40	0.769	0.761	0.761
		0.583	0.796	0.97	0.26	0.18	0.29	0.15	0.38	0.771	0.761	0.761
		0.593	0.778	0.96	0.25	0.16	0.28	0.14	0.42	0.769	0.765	0.758
5		0.503	0.760	0.96	0.24	0.19	0.27	0.16	0.38	0.769	0.760	0.753
		0.532	0.726	0.98	0.25	0.21	0.29	0.13	0.37	0.766	0.753	0.741
		0.537	0.747	0.97	0.24	0.22	0.27	0.15	0.36	0.768	0.756	0.747

Для реалізації (відпрацювання) основних результатів моделювання розглядалась схема електроенергетичної системи (рис. 4), яка містить 26 елегазових (ЕВ), 50 повітряних (ПВ) 16 масляних вимикачів (МВ). Основні параметри і характеристики елементів схеми наведені в табл. 8. Методами статистичного моделювання було проведено дослідження і виконана оцінка ризику порушення динамічної стійкості в даній електроенергетичній системі при відмовах електрообладнання. Результати розрахунків представлені на рис. 5.

Таблиця 6. Результати розрахунку імовірності відмови елегазового вимикача

№	λ_{ϕ} , рік ⁻¹			Імовірність відмови вимикача $F_{\phi}(t)$, в.о.		
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 1	Метод 2	Метод 3
1	0.0095	0.0078	0.0079	0.00152	0.00102	0.00106
	0.0094	0.0081	0.0082	0.00150	0.00112	0.00115
	0.0094	0.0079	0.0081	0.00150	0.00107	0.00110
2	0.0133	0.0112	0.0111	0.00210	0.00150	0.00147
	0.0133	0.0108	0.0108	0.00210	0.00141	0.00141
	0.0133	0.0113	0.0113	0.00210	0.00152	0.00154
3	0.0159	0.0128	0.0128	0.00252	0.00164	0.00164
	0.0161	0.0128	0.0129	0.00259	0.00164	0.00166
	0.0161	0.0129	0.0129	0.00259	0.00166	0.00166
4	0.0208	0.0202	0.0198	0.00519	0.00487	0.00467
	0.0210	0.0208	0.0208	0.00528	0.00519	0.00519
	0.0210	0.0208	0.0209	0.00528	0.00515	0.00524
5	0.0157	0.0133	0.0131	0.00246	0.00177	0.00171
	0.0156	0.0133	0.0129	0.00243	0.00177	0.00166
	0.0160	0.0129	0.0130	0.00256	0.00166	0.00169

Таблиця 7. Результати розрахунку імовірності відмови повітряного вимикача

№	λ_{ϕ} , рік ⁻¹			Імовірність відмови вимикача $F_{\phi}(t)$, в.о.		
	Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 1	Метод 2	Метод 3
1	0.0257	0.0254	0.0253	0.01957	0.01917	0.01897
	0.0256	0.0255	0.0250	0.01947	0.01927	0.01862
	0.0256	0.0251	0.0251	0.01947	0.01872	0.01867
2	0.0283	0.0279	0.0274	0.02144	0.02073	0.02008
	0.0285	0.0280	0.0277	0.02166	0.02095	0.02051
	0.0284	0.0280	0.0276	0.02150	0.02100	0.02040
3	0.0273	0.0267	0.0263	0.02068	0.01978	0.01916
	0.0274	0.0270	0.0266	0.02084	0.02021	0.01968
	0.0274	0.0270	0.0265	0.02079	0.02015	0.01952
4	0.0256	0.0254	0.0254	0.01952	0.01912	0.01912
	0.0257	0.0254	0.0254	0.01962	0.01912	0.01912
	0.0256	0.0255	0.0253	0.01952	0.01932	0.01897
5	0.0265	0.0262	0.0260	0.02019	0.01972	0.01936
	0.0264	0.0260	0.0256	0.02003	0.01936	0.01876
	0.0265	0.0261	0.0258	0.02013	0.01952	0.01906

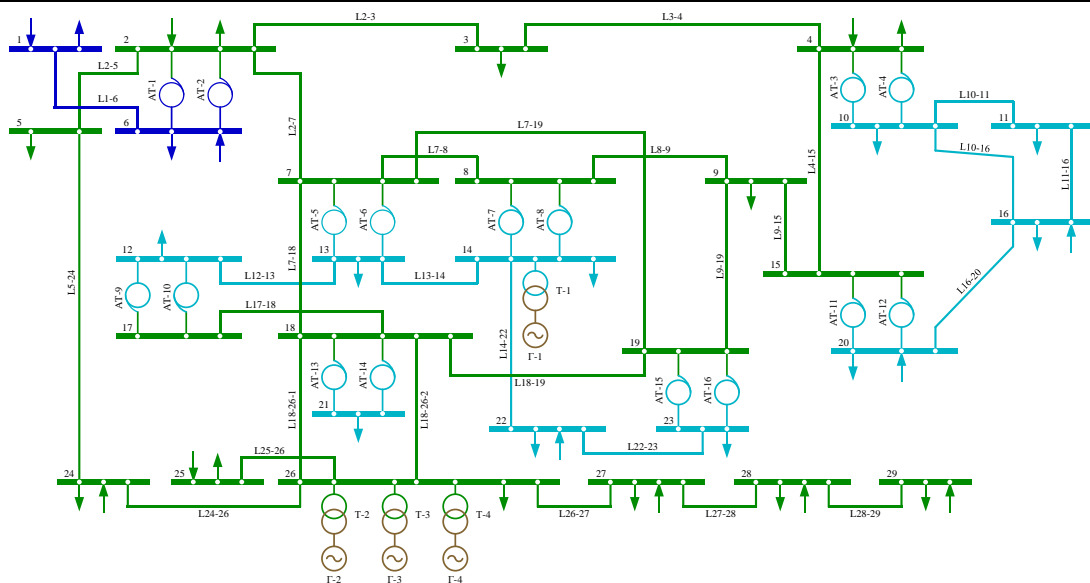
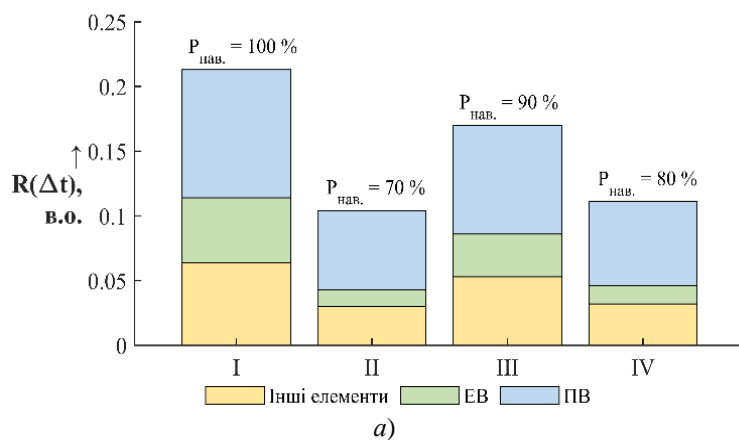


Рисунок 4 – Розрахункова схема моделі ЕЕС

Таблиця 8. Основні параметри і характеристики елементів схеми ЕЕС

№	Найменування електрообладнання схеми ЕЕС	Кількість років експлуатації			№	Найменування електрообладнання схеми ЕЕС	Кількість років експлуатації		
		S, L	B	B			S, L	B	B
Автотрансформатори 750 кВ									
1	АТ-1	14	14	14	2	АТ-2	19	19	19
Автотрансформатори 330 кВ									
3	АТ-3	15	15	15	10	АТ-10	6	6	6
4	АТ-4	16	16	16	11	АТ-11	15	15	15
5	АТ-5	16	16	16	12	АТ-12	15	15	15
6	АТ-6	17	17	17	13	АТ-13	9	9	9
7	АТ-7	29	29	29	14	АТ-14	29	29	29
8	АТ-8	28	28	28	15	АТ-15	29	29	29
9	АТ-9	15	15	15	16	АТ-16	29	29	29
ЛЕП 750 кВ									
17	L1-6	10	10	10					
ЛЕП 330 кВ									
18	L2-3	27	17	17	29	L9-19	29	10	10
19	L2-5	23	23	23	30	L17-18	23	23	23
20	L2-7	28	28	28	31	L18-19	29	29	29
21	L3-4	17	12	12	32	L18-26-1	30	30	30
22	L4-15	23	23	23	33	L18-26-2	29	29	29
23	L5-24	17	12	12	34	L24-26	30	30	30
24	L7-8	27	27	27	35	L25-26	11	11	11
25	L7-18	29	29	29	36	L26-27	18	18	18
26	L7-19	8	8	8	37	L27-28	21	21	21
27	L8-9	11	11	11	38	L28-29	17	17	17
28	L9-15	23	10	10					
ЛЕП 110 кВ									
39	L10-11	21	21	21	43	L13-14	28	28	28
40	L10-16	30	30	30	44	L14-22	14	5	7
41	L11-16	30	30	30	45	L16-20	28	28	28
42	L12-13	27	27	27	46	L22-23	25	25	25

Проведений аналіз результатів розрахунку показав суттєвий внесок в агрегований показник ризику терміну напрацювання електрообладнання. Разом з цим внаслідок значно меншої інтенсивності відмов елементарних вимикачів ризик порушення динамічної стійкості від їх відмов становить [0.013 – 0.05] тоді як для повітряних він складає [0.061 – 0.099].



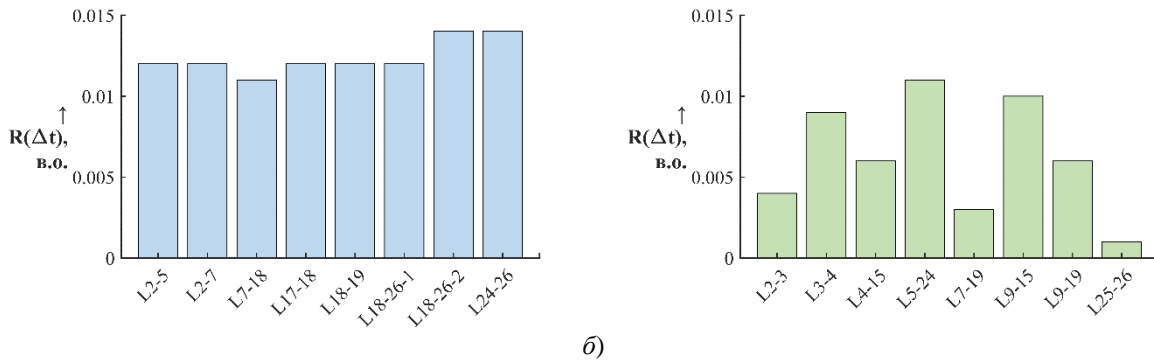


Рисунок 5 – Результати розрахунків:

а – Ризик порушення динамічної стійкості схеми ЕЕС $R(\Delta t)$;

б – Ризик порушення динамічної стійкості схеми ЕЕС на І інтервалі спостереження внаслідок відмови вимикачів на ЛЕП 330 кВ

Висновки. Проаналізовано умови функціонування комутаційного обладнання в сучасних електроенергетичних системах. Розроблена лінгвістична математична модель оцінки технічного стану та визначення імовірності відмови елегазового вимикача. Запропоновано підхід для оцінки ступеню значущості функціональних вузлів елегазового вимикача в частині впливу на загальний спрацьований ресурс. Для схеми підсистеми ЕЕС НЕК «Укренерго», проведено дослідження нечітких моделей оцінки ТС елегазових і повітряних вимикачів та визначено імовірність їх відмови на інтервалі часу спостереження, розраховано ризик порушення динамічної стійкості ЕЕС при відмовах високовольтних вимикачів.

Список використаної літератури

1. Kosterev N. V., Bardyk E. I., Litvinov V. V. Preventive risk-management of power system for its reliability increasing. *Wseas Transactions on Power Systems*. 2015. P. 251-258.
2. Бардик Є. І., Костерев М. В., Болотний М. П. Підвищення надійності функціонування енергокомпаній на основі оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій при відмовах електрообладнання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2014. № 39. С. 13-19.
3. Bardyk E. I., Bolotnyi N. P. Electric power system simulation for risk assessment of power transformer failure at an external short-circuit fault. *2017 IEEE first Ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON)*. 2017. P. 452-456. URL: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100527>.
4. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л. Оцінка режимної надійності електроенергетичної системи на основі визначення індексу ризику при відмовах вузлів навантаження з відповідальними споживачами. *Технічні науки та технології*. 2019. № 2(16). С. 105-117.
5. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 131 с.
6. Абдурахманов А. М., Мисриханов М. Ш., Шунтов А. В. Влияние продолжительности эксплуатации на отказы выключателей в высоковольтных электрических сетях. *Электрические станции*. 2007. № 7. С. 59-63.
7. О надёжности ячеек элегазовых выключателей 110-750 кВ подстанций / А. А. Абдурахманов и др. *Электрические станции*. 2011. № 1. С. 51-54.
8. Žarković M., Stojković Z. Artificial intelligence SF6 circuit breaker health assessment. *Electric Power Systems Research*. 2019. No. 175. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105912>.
9. Choonhapran P. Applications of high voltage circuit-breakers and development of aging models : Ph.D. Thesis. Darmstadt, 2007. 171 p. URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/930>.
10. Choonhapran P., Balzer G. Cascading reliability model for HV circuit-breakers. *2007 IEEE Lausanne Power Tech*. 2007. P. 1770-1775. URL: <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538584>.
11. Selection of an optimal maintenance and replacement strategy of HV equipment by a risk assessment process. / G. Balzer et al. Paris : CIGRE, 2006. Pap. B3-103.
12. Reliability and electrical stress survey on high voltage circuit breakers in Japan. / Y. Nakada, J. Kida, I. Takagi etc. Paris : CIGRE, 2006. Pap. A3-205.
13. Визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів / Б. С. Стогній та ін. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 71-80. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2017_1_12.
14. Доморошин С. В., Махлин П. В. Визначення спрацьованого ресурсу елегазового вимикача типу HGF 100/2 В, С GEC ALSTHOM за нечіткою моделлю. *Електротехніка і електроенергетика*. 2016. № 2. С. 72-81.

15. Бардик Є. І. Моделювання та оцінка ризику відмов електрообладнання електроенергетичних систем з урахуванням рівня відновлення ресурсу після ремонту. *Науковий вісник НГУ*. 2014. № 3. С. 82-90.
16. Dehghanian P., Popovic T., Kezunovic M. Circuit breaker operational health assessment via condition monitoring data. 2014 *North American Power Symposium (NAPS)*. 2014. P. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965427>.
17. Dehghanian P., Guan Y., Kezunovic M. Real-time life-cycle assessment of high-voltage circuit breakers for maintenance using online condition monitoring data. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018. No. 55. P. 1135-1146. URL: <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2878746>.
18. Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition / E. A. L. Vianna et al. *Electric Power Systems Research*. 2017. No. 142. P. 36-46. URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.018>.
19. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
20. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
21. Метод формування нечіткого логічного висновку із залученням експертного комітету / С. Ф. Теленик і інші. *Проблеми програмування*. 2008. № 4. С. 73-83.
22. Костерев М. В., Бардик Є. І., Литвинов В. В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2011. № 11. С. 199-204.

Ye. Bardyk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5776-1500
O. Bondarenko, Ph.D. student, ORCID 0000-0001-9444-8428
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

FUZZY MODELING OF SWITCHING EQUIPMENT FOR TASKS OF ASSESSING THE RISK OF EMERGENCY SITUATIONS IN THE EPS IN CASE OF ELECTRICAL EQUIPMENT FAILURES

Today in the electric power industry of Ukraine the issue of assessing the risk of EPS operation due to failures of electrical equipment is particularly important. Failures are associated with significant level of aging and low replacement rates of electrical equipment, also with the possible simultaneous emergency decommissioning of several elements as a result of terrorist attacks.

Based on the analysis of the operating conditions of high-voltage switching equipment, standards and operational documentation method of diagnosing the technical condition of SF₆ circuit breakers is proposed. This method is based on the use of fuzzy set theory.

To assess the risk of power outages in the EPS in case of electrical equipment failures, a linguistic model is proposed for determining the total residual life and the probability of failure of SF₆ high-voltage circuit breakers of various types. Which is based on the aggregation of information on the technical condition of individual functional units.

An approach is proposed to take into account the importance of individual units of the circuit breaker in terms of the impact on the total residual life by weight coefficients determined due to failure statistics. The result of determining the total residual life is the ability to estimate the probability of failure on the observation time interval.

Tuning and adaptation of the developed linguistic model of the SF₆ circuit breaker to real operating conditions is provided by adjusting the parameters of the membership functions of the terms of the input linguistic variables using weighting coefficients and fuzzy inference with weighted average truth.

The developed linguistic mathematical model for assessing the technical condition and probability of failure of SF₆ circuit breakers can be used as a component of the complex of risk analysis programs in the EPS. And the formation of preventive actions to ensure the operational reliability of electrical equipment and regime reliability of the EPS in case of emergency equipment failures.

Key words: *fuzzy logic, circuit breaker, resource, risk, failure, technical condition.*

References

1. N. V. Kosterev, E. I. Bardyk, and V. V. Litvinov, "Preventive risk-management of power system for its reliability increasing," in *Wseas Transactions on Power Systems*, 2015, pp. 251-258.
2. E. I. Bardyk, M. V. Kosterev, and N. P. Bolotnyi, "Improving reliability of operation of power companies on the basis of risk assessment of emergency situations at the failures of electrical equipment," *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 39, pp. 13-19, 2014.

3. E. I. Bardyk, and N. P. Bolotnyi, "Electric power system simulation for risk assessment of power transformer failure under external short-circuit conditions," in *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 452-456. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100527>.
4. Ye. Bardyk, and O. Bondarenko, "Assessment of regime reliability of electric power system based on the definition of risk index in case of failure of the load with responsible consumers," *Technical sciences and technologies*, no. 2(16), pp. 105-117, 2019.
5. E. I. Bardyk, M. V. Kosterev, The issue of building fuzzy models for assessing the technical condition of objects of electrical systems. Kyiv: NTUU «KPI», 2010, 131 pp.
6. M. Abdurakhmanov, M. Misrikhanov, and A. Shuntov, "Influence of service life on failures of circuit breakers in high-voltage electrical networks," *Electrical stations*, no. 7, pp. 59-63, 2007.
7. Y. Dementyev, M. Misrikhanov, E. Stolyarov, M. Abdurakhmanov, V. Fedorov, and A. Shuntov, "The reliability of the gas-filled 110-750 kV circuit breaker units of substations," *Electrical stations*, no. 1, pp. 51-54, 2011.
8. M. Žarković, and Z. Stojković, "Artificial intelligence SF6 circuit breaker health assessment," *Electric Power Systems Research*, no. 175, pp. 1-6, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105912>.
9. P. Choonhapran, "Applications of high voltage circuit-breakers and development of aging models." Ph.D. Thesis, Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2007. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/930>.
10. P. Choonhapran, and G. Balzer, "Cascading reliability model for HV circuit-breakers," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 1770-1775. <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538584>.
11. G. Balzer, K. Bakic, H.-J. Haubrich, C. Neumann, and C. Schorn, "Selection of an optimal maintenance and replacement strategy of HV equipment by a risk assessment process", CIGRE, Report B3-103, 2006.
12. Y. Nakada, I. Takagi, M. Shin, J. Kida, M. Toyoda, and H. Ito, "Reliability and electrical stress survey on high voltage circuit breakers in Japan", CIGRE, Report A3-205, 2006.
13. B. S. Stognii, M. F. Sopel, L. D. Tretiakova, E. M. Tankevych, A. V. Panov, and V. I. Pankiv, "Evaluation of high-voltage circuit breaker interruption resource," *Technical Electrodynamics*, no. 1, pp. 71-80, 2017. http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2017_1_12.
14. S. V. Domoroshchyn, and P. V. Makhlin, "The developed resource definition of gas-insulated switch type HGF 100/2 B, C GEC ALSTHOM for a fuzzy model," *Electrical Engineering and Power Engineering*, no. 2, pp. 72-81, 2016.
15. Ye. I. Bardyk, "Modelling and assessment of chances of failure of power systems electrical equipment taking into account the after repair resource restoration level," *Visnyk of National Mining University*, no. 3, pp. 82-90, 2014.
16. P. Dehghanian, T. Popovic, and M. Kezunovic, "Circuit breaker operational health assessment via condition monitoring data," in *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, 2014, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965427>.
17. P. Dehghanian, Y. Guan, and M. Kezunovic, "Real-time life-cycle assessment of high-voltage circuit breakers for maintenance using online condition monitoring data," *Transactions on Industry Applications*, no. 55, pp. 1135-1146, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2878746>.
18. E. A. L. Vianna, A. R. Abaide L. N. Canha, and V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," *Electric Power Systems Research*, no. 142, pp. 36-46, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.018>.
19. S. D. Shtovba, Designing fuzzy systems using MATLAB. Moscow : Hot line – Telecom, 2007, 288 pp.
20. A. Leonenkoff, Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTech. St.Petersburg : BHV-ST.PETERSBURG, 2003, 736 pp.
21. S. F. Telenyk, P. I. Bidiuk, L. O. Korshevniuk, and V. S. Khmeliuk, "The fuzzy logic based approach for problem of multicriterion expert estimation," *Problems in programming*, no. 4, pp. 73-83, 2008.
22. N. V. Kosterev, E. I. Bardyk, and V. V. Litvinov, "Assessment of the probability of failure of electrical equipment in the electrical system management mode," *Scientific works of DonNTU. Series: "Electrical engineering and energy"*, no. 11, pp. 199-204, 2011.

Надійшла 12.10.2022
Received 12.10.2022