

УДК 621.3

Є.І. БАРДИК (канд. техн. наук)
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
Kafedra et@fea.kpi.ua

ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ З УРАХУВАННЯМ РІВНЯ ВІДНОВЛЕННЯ РЕСУРСУ ПІСЛЯ РЕМОНТУ

В роботі запропоновані підхід і математична модель для оцінки рівня відновлення ресурсу працездатності електрообладнання після ремонту та визначення імовірності відмови високовольтних вимикачів на інтервалі спостереження. Для побудови математичної моделі і функції розподілу імовірності відмови вимикача використовуються методи теорії нечітких множин і теорії імовірностей.

Ключові слова: відмова, ресурс, нечіткі множини, імовірність, електрообладнання, ризик, відновлення.

Вступ. В умовах об'єктивно існуючого зниження надійності електропостачання споживачів, зумовленого перш за все значним старінням парку електрообладнання, зростає роль достовірності оцінки показників надійності електрообладнання і підсистем електроенергетичних систем (ЕЕС) на протязі заданого інтервалу часу. Рівень зниження надійності електропостачання споживачів доцільно оцінювати показником ризику [1, 3], який включає в себе імовірність відмови електрообладнання та їх наслідки.

Значна частка (близько 90%) аварій які виникають в сучасних ЕЕС, припадає на аварії в електричних мережах. Задачі локалізації аварій в сучасних електричних системах і підстанціях в першу чергу виконують високовольтні вимикачі. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів від надійності функціонування яких в значній мірі залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів як в нормальних так і в аварійних режимах. Тому задача розробки математичних моделей оцінки технічного стану (ТС), прогнозування ресурсу працездатності та визначення імовірності відмови високовольтних вимикачів на інтервалі часу є актуальною задачею.

Постановка задачі. В [4] запропонована модель комплексної оцінки ТС високовольтного вимикача, яка побудована на основі нечіткої логіки і ґрунтується на агрегуванні показників ТС окремих функціональних вузлів та дозволяє визначати загальний спрацьований ресурсу вимикача. У математичній моделі вимикача [5] з використанням функції розподілу імовірності відмов $F(t)$, модифікованої до реальних умов експлуатації (враховується загальний спрацьований технічний ресурс вимикача) визначається імовірність відмови на інтервалі часу Δt .

Практика експлуатації електрообладнання ЕЕС показує, що після проведення ремонтних робіт не завжди можливо повністю відновити функціональний стан і ресурс їх окремих вузлів. Тому проводять також комплекс перевірок і випробувань з метою кількісної або якісної оцінки післяремонтного стану електрообладнання. Така оцінка ТС і ресурсу окремих вузлів, необхідна, оскільки впливає на загальний технічний ресурс об'єкта S , термін служби $T_{сл}$, частоту відмов і витрати, пов'язані з аварійними відмовами електрообладнання.

Разом з цим, застосування в сучасних енергосистемах технічних засобів контролю, мікропроцесорних пристроїв обробки результатів вимірювань і випробувань електрообладнання дозволяє з достатньою для практики точністю визначити рівень відновлення ресурсу після ремонту окремих елементів, функціональних вузлів так і електрообладнання в цілому та врахувати в моделях визначення імовірності відмов вимикачів.

Метою даної роботи є розробка з використанням теорії нечітких множин математичних моделей, оцінки імовірності відмови високовольтних вимикачів на інтервалі часу спостереження з урахуванням технічного стану (ТС) в момент спостереження та рівня відновлення ресурсу після ремонту.

Нечітка математична модель оцінки рівня відновлення ресурсу електрообладнання після ремонту. З точки зору визначення рівня післяремонтного відновлення електрообладнання як модель доцільно використати залежність ресурсу працездатності від параметрів, які повинні задовольняти наступним вимогам [6, 7]: бути ідентичними параметрам, що враховуються при проектуванні; відображати основні експлуатаційні характеристики електрообладнання; був простий зв'язок між зміненням загального ресурсу працездатності електрообладнання та змінною при цьому експлуатаційних характеристик елементів і параметрів ТС.

Кожний елемент електрообладнання характеризується великою кількістю параметрів технічного стану, а рівень відновлення ресурсу елемента суттєво залежить від того наскільки параметри відхиляються від нормативних значень. Тому оцінку інтегрального показника рівня відновлення ресурсу елемента, функціонального вузла і одиниці електрообладнання в цілому, доцільно здійснювати на основі використання багаторівневих ієрархічних структурних схем і математичних моделей [3, 9, 10].

На рис. 1 зображена спрощена ієрархічна структурна схема моделі, яка ілюструє залежність стану кожного елемента від своїх параметрів, а також залежність інтегрального показника відновлення ресурсу від стану окремих елементів і функціональних вузлів(ФВ). В умовах, коли неможливо встановити аналітичний зв'язок між зміненням параметрів післяремонтного ТС об'єкта і інтегральним показником рівня відновлення ресурсу

об'єкта, кількісну оцінку післяремонтного ресурсу працездатності доцільно формувати експертними методами з використанням теорії нечітких множин.

Параметри післяремонтного технічного стану елементів електрообладнання A_i в межах допустимого змінювання в діапазоні $A_{in} \leq A_i \leq A_{доп}$ представимо лінгвістичною змінною “Величина параметру ТС електрообладнання” з 5-ма терм-множинами $T_{A_i}^{ДН}, T_{A_i}^H, T_{A_i}^C, T_{A_i}^B, T_{A_i}^{ДВ}$ - дуже низьке, низьке, середнє, високе, дуже високе значення параметру ТС відповідно. Графіки змінення функцій належності терм-множинам лінгвістичної змінної A_i представлені на рис.2. В табл.1 наведено класифікацію поточних значень параметру технічного стану A_i елемента, як критерій розбиття повної множини їх значень на нечіткі множини.

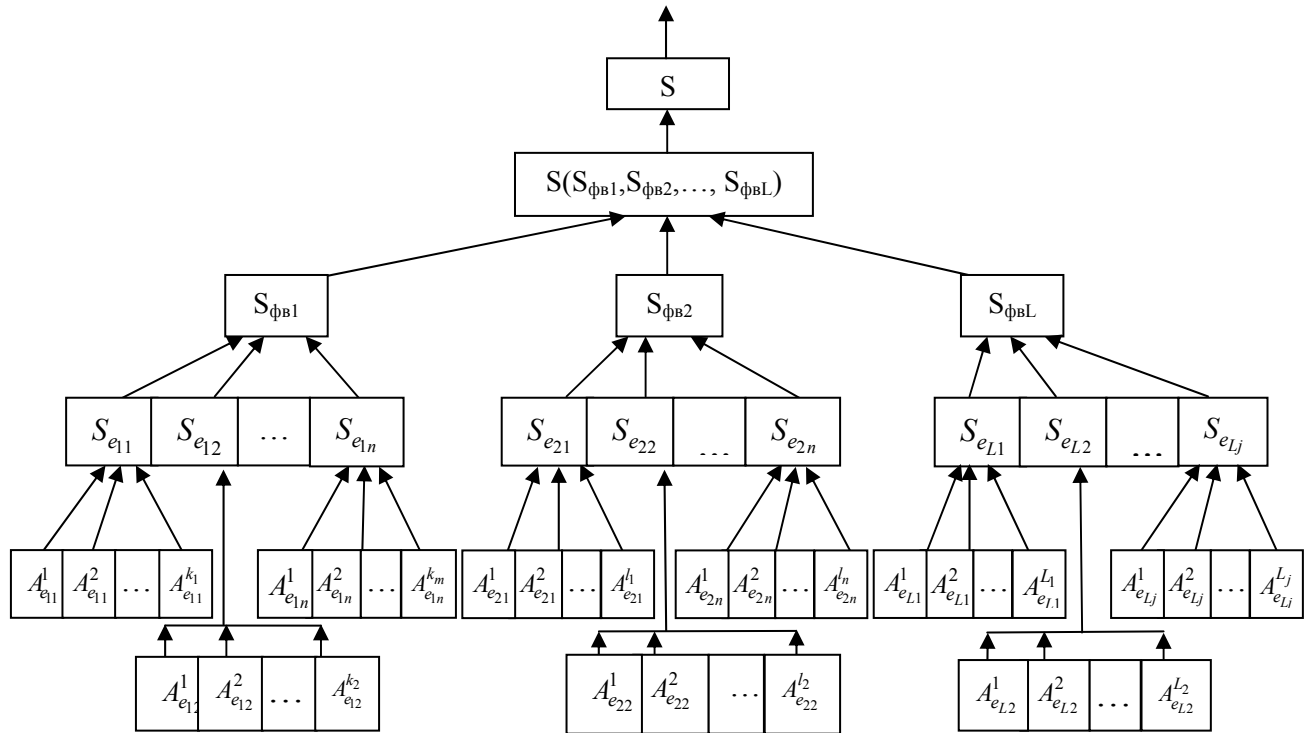


Рисунок 1 – Загальна ієрархічна структурна схема моделі визначення показника відновлення ресурсу електрообладнання: A_i – параметри технічного стану після ремонту електрообладнання; S_e – ресурс працездатності після ремонту елементів електрообладнання; $S_{фв}$ – ресурс працездатності після ремонту функціональних вузлів електрообладнання.

Таблиця 1 – Класифікація поточних значень параметрів технічного стану A_i

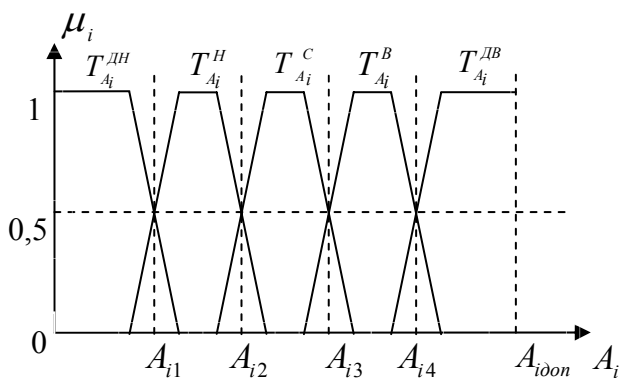


Рисунок 2 – Функції належності нечітких термів лінгвістичних змінних параметрів технічного стану електрообладнання.

№ п/п	Позначення параметра	Терм-множини лінгвістичної змінної “Величина параметру технічного стану після ремонту електрообладнання”				
		“Дуже низьке”	“Низьке”	“Середнє”	“Високе”	“Дуже високе”
1	A_1	$T_{A_1}^{ДН}$	$T_{A_1}^H$	$T_{A_1}^C$	$T_{A_1}^B$	$T_{A_1}^{ДВ}$
2	A_2	$T_{A_2}^{ДН}$	$T_{A_2}^H$	$T_{A_2}^C$	$T_{A_2}^B$	$T_{A_2}^{ДВ}$
3	A_3	$T_{A_3}^{ДН}$	$T_{A_3}^H$	$T_{A_3}^C$	$T_{A_3}^B$	$T_{A_3}^{ДВ}$
.
N	A_N	$T_{A_N}^{ДН}$	$T_{A_N}^H$	$T_{A_N}^C$	$T_{A_N}^B$	$T_{A_N}^{ДВ}$
	S_{ei}	$T_{S_e}^{ДН}$	$T_{S_e}^H$	$T_{S_e}^C$	$T_{S_e}^B$	$T_{S_e}^{ДВ}$

Рівні відновлення ресурсу працездатності елемента S_{ei} , функціонального вузла $S_{фвi}$ і одиниці електрообладнання в цілому S , що змінюються в діапазоні 0÷1 представимо лінгвістичними змінними “Рівень відновлення ресурсу після ремонту” з відповідними терм-множинами. Графіки функцій належності до терм-

множин «Дуже низьке», «Низьке», «Середнє», «Високе», «Дуже високе» ($T_{A_i}^{DH}, T_{A_i}^H, T_{A_i}^C, T_{A_i}^B, T_{A_i}^{DB}$) значення рівня відновлення ресурсу працездатності після ремонту елемента, функціонального вузла і об'єкта в цілому наведено на рис.3а-3в.

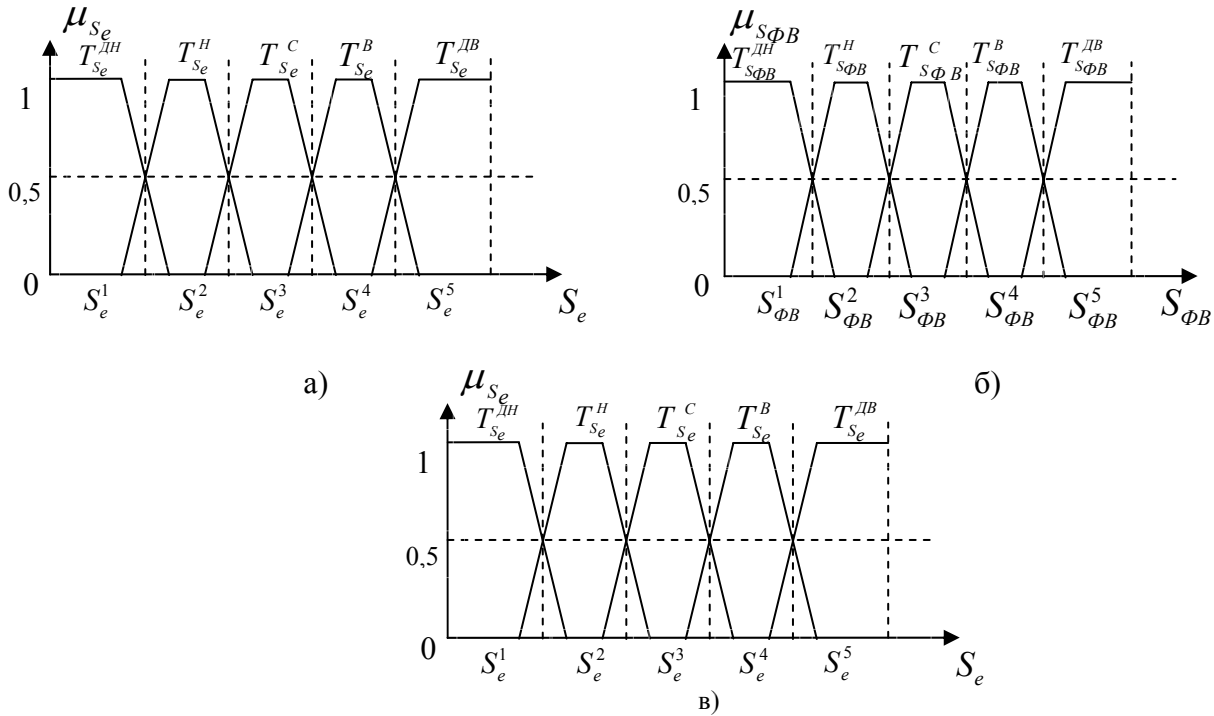


Рисунок 3 – Функції належності нечітких термів лінгвістичних змінних “Рівень відновлення ресурсу після ремонту”: а – елементу, б – функціонального вузла, в – одиниці електрообладнання в цілому.

В табл.2 і 3 наведено класифікацію поточних значень ресурсу після ремонту елемента R_{e_i} , функціонального вузла $R_{ФВ_j}$, як критерій розбиття повної множини, значень на нечіткі множини, причому в клітинах табл. 2, 3 стоять трапецевидні числа, які характеризують відповідні функції належності.

Таблиця 2 – Класифікація поточних значень ресурсу після ремонту елемента електрообладнання.

№ п/п	Позначення	Терм-множини лінгвістичної змінної «Рівень відновлення ресурсу елемента електрообладнання після ремонту»				
		«Дуже низький»	«Низьке»	«Середнє»	«Високе»	«Дуже високе»
1	S_{e_1}	$T_{S_{e_1}}^{DH}$	$T_{S_{e_1}}^H$	$T_{S_{e_1}}^C$	$T_{S_{e_1}}^B$	$T_{S_{e_1}}^{DB}$
2	S_{e_2}	$T_{S_{e_2}}^{DH}$	$T_{S_{e_2}}^H$	$T_{S_{e_2}}^C$	$T_{S_{e_2}}^B$	$T_{S_{e_2}}^{DB}$
3	S_{e_3}	$T_{S_{e_3}}^{DH}$	$T_{S_{e_3}}^H$	$T_{S_{e_3}}^C$	$T_{S_{e_3}}^B$	$T_{S_{e_3}}^{DB}$
.
M	S_{e_M}	$T_{S_{e_M}}^{DH}$	$T_{S_{e_M}}^H$	$T_{S_{e_M}}^C$	$T_{S_{e_M}}^B$	$T_{S_{e_M}}^{DB}$
	$S_{ФВ}$	$T_{S_{ФВ}}^{DH}$	$T_{S_{ФВ}}^H$	$T_{S_{ФВ}}^C$	$T_{S_{ФВ}}^B$	$T_{S_{ФВ}}^{DB}$

Таблиця 3 – Класифікація поточних значень ресурсу після ремонту функціонального вузла одиниці електрообладнання.

№ п/п	Позначення	Терм-множини лінгвістичної змінної “Рівень відновлення ресурсу ФВ після ремонту”				
		«Дуже низьке»	«Низьке»	«Середнє»	«Високе»	«Дуже високе»
1	$S_{ФВ_1}$	$T_{S_{ФВ_1}}^{DH}$	$T_{S_{ФВ_1}}^H$	$T_{S_{ФВ_1}}^C$	$T_{S_{ФВ_1}}^B$	$T_{S_{ФВ_1}}^{DB}$
2	$S_{ФВ_2}$	$T_{S_{ФВ_2}}^{DH}$	$T_{S_{ФВ_2}}^H$	$T_{S_{ФВ_2}}^C$	$T_{S_{ФВ_2}}^B$	$T_{S_{ФВ_2}}^{DB}$
3	$S_{ФВ_3}$	$T_{S_{ФВ_3}}^{DH}$	$T_{S_{ФВ_3}}^H$	$T_{S_{ФВ_3}}^C$	$T_{S_{ФВ_3}}^B$	$T_{S_{ФВ_3}}^{DB}$
.
L	$S_{ФВ_L}$	$T_{S_{ФВ_L}}^{DH}$	$T_{S_{ФВ_L}}^H$	$T_{S_{ФВ_L}}^C$	$T_{S_{ФВ_L}}^B$	$T_{S_{ФВ_L}}^{DB}$
	S	T_S^{DH}	T_S^H	T_S^C	T_S^B	T_S^{DB}

Математична модель для визначення рівня відновлення ресурсу працездатності об'єкта, яка у відповідності із ієрархічною структурною схемою (рис.1) ґрунтуються на агрегуванні кількісних даних з усіх рівнів ієрархії, має вигляд:

$$S = \{G, M, B\},$$

де G – деревовидна ієрархія впливу змінення параметрів технічного стану A_i , що визначаються після ремонту, та ресурсів працездатності після ремонту елементів S_{e_i} і функціональних вузлів $S_{ФВ_j}$; B – набір якісних (кількісних) оцінок рівня відновлення ресурсу після ремонту елемента або функціонального вузла у відповідній ієрархії; M – система відношень переваг щодо впливу на загальний ресурс працездатності після ремонту одних

параметрів ТС A_i , ресурсів елементів S_{ei} , функціональних вузлів $S_{фвi}$ після ремонту іншим $A_j, S_{ej}, S_{фвj}$ відповідно до одного рівня ієрархії:

$$M = \{A_i(\varphi) A_j, S_{ei}(\varphi) S_{ej}, S_{фвi}(\varphi) S_{фвj} \mid \varphi \in (\succ, \approx)\},$$

де \succ - відношення строгої переваги; \approx відношення байдужості.

Деревовидна ієрархія (структурна схема моделі) являє собою орієнтований граф без циклів, петель, горизонтальних ребер в межах одного рівня ієрархії і містить одну кореневу вершину:

$$G = \langle \{S_{ei}\}, \{S_{фвi}\}, \{V_{ij}\} \rangle,$$

де $\{S_{ei}\}, \{S_{фвi}\}$ – множини вершин факторів, що відповідають величинам ресурсу працездатності після ремонту елементів і функціональних вузлів об'єкта відповідно; S – коренева вершина, що відповідає величині ресурсу працездатності після ремонту об'єкта; V_{ij} – множина дуг графа в якому початок дуги відповідає вершині нижнього рівня ієрархії, а кінцю дуги - вершина рангу, що на одиницю більший.

В першому наближенні вплив кожного параметра A_i на показник якості ремонту елементу S_{ei} , функціонального вузла $S_{фвj}$ і на ресурс працездатності об'єкта S можна врахувати з допомогою деякого коефіцієнта значущості K_i , для оцінки якого необхідно розмістити всі параметри по порядку спадання значущості: $K_1 > K_2 > \dots > K_N$, де N - кількість параметрів технічного стану елементів, або ФВ. В цьому випадку коефіцієнт значущості (впливу) i -го параметру можна визначити по правилу Фішберна [3]:

$$K_i = \frac{2(N-i-1)}{(N+1)N}.$$

Якщо в систему разом з перевагами входять відношення байдужості, то набір ваг K_i Фішберна, та ваговий коефіцієнт i -го фактора впливу P_i визначається:

$$K_{i-1} = \begin{cases} K_i, F_{i-1} \approx F_i \\ K_{i+1}, F_{i-1} \succ F_i \\ K_N = 1, i = N..2 \end{cases}, P_i = \frac{K_i}{K}, K = \sum_{i=1}^N K_i,$$

де $\{F_i\}$ – множина вершин факторів впливу(ресурсів працездатності після ремонту $S_{ei}, S_{фвj}$); N – кількість параметрів ТС або кількість елементів чи функціональних вузлів об'єкта.

Остаточно інтегральні показники рівня відновлення після ремонту елементів S_e , функціонального вузла $S_{фв}$ на основі запропонованої нечіткої моделі визначаються з формул:

$$S_e = \sum_{j=1}^5 S_e^j \sum_{i=1}^N K_i \mu_{ij}(A_i),$$

$$S_{фв} = \sum_{j=1}^5 S_{фв}^j \sum_{i=1}^N P_i \mu_{ij}(S_{ei}).$$

Розглянемо випадок, коли визначення ресурсу працездатності $S_e, S_{фв}, S$ необхідно провести тільки на основі кількісних оцінок, тобто всі фактори впливу на значення ресурсу є кількісно вимірними або визначеними.

Тоді будь-якій кількісній оцінці фактора впливу F_i (зокрема $A_i, S_{ei}, S_{фвj}, S$) можна поставити у відповідність вектор із п'яти значень відповідних функцій належності класифікатора:

$$B_*(F_i) = \{\mu_{*1}(a_{F_i}), \mu_{*2}(a_{F_i}), \mu_{*3}(a_{F_i}), \mu_{*4}(a_{F_i}), \mu_{*5}(a_{F_i})\},$$

де a_F – кількісна оцінка фактора a_F впливу на ресурс працездатності; $\mu_{*j}(i=1,5)$ – функції належності, що визначаються з графіків для функцій належності, представлених на рис.2, 3а, 3б, або із відповідних аналітичних залежностей, причому сума всіх компонентів вектора $B_*(a_F)$ дорівнює одиниці.

При цьому інтегральний показник рівня відновлення ресурсу об'єкта, який одержуємо шляхом агрегування показників нижніх рівнів ієрархії G також являє собою вектор з п'яти функцій належності:

$$B_{*S}(a_S) = \{\mu_{*1}(a_S), \mu_{*2}(a_S), \mu_{*3}(a_S), \mu_{*4}(a_S), \mu_{*5}(a_S)\},$$

де a_S – кількісна оцінка інтегрального показника S .

Скалярний вектор, який характеризує величину працездатності об'єкта після ремонту визначається:

$$S = \sum_{i=1}^5 (0, 2i-1) \mu_{*i}(a_S).$$

На прикладі високовольтного повітряного вимикача розглянемо вплив рівня відновлення ресурсу працездатності після ремонту на імовірність відмови на інтервалі часу. Основними функціональними вузлами повітряного вимикача є: дугогасильна камера, пневмосистема, шафа керування, привід. Узагальнена структурна схема нечіткого логічного висновку для оцінки рівня відновлення ресурсу після ремонту повітряного вимикача наведена на рис 4.

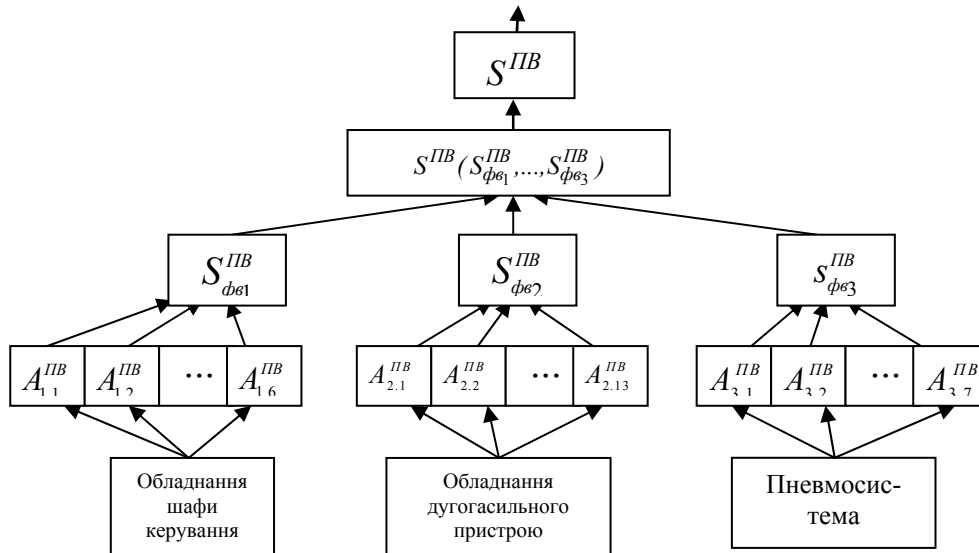


Рисунок 4 – Ієрархічна схема нечіткого логічного висновку для визначення рівня відновлення ресурсу після ремонту повітряного вимикача

Для різних сполучень параметрів, що визначаються при післяремонтних вимірюваннях і випробуваннях в таблиці наведено результати визначених по запропонованій моделі значення інтегрального значення ресурсу працездатності повітряного вимикача після ремонту $S_{пр}^{PB}$.

Таблиця 5 – Результати розрахунку ресурсу повітряного вимикача після ремонту.

Загальний технічний ресурс вимикача після ремонту	Номер випробування				
	1	2	3	4	5
$S_{пр}^{PB}$	1	0,95	0,91	0,88	0,85

З точки зору реальної практики експлуатації важливо знати як величину імовірності відмови вимикача на інтервалі часу Δt , так і термін вичерпання ресурсу працездатності. Останні в значній мірі визначаються величиною спрацьованого технічного ресурсу вимикача $S_{сп}$, який, в свою чергу, залежить від рівня відновлення загального технічного ресурсу працездатності S після ремонту.

В [3, 7] представлена нечітка модель високовольтного повітряного вимикача, яка дозволяє за алгоритмом нечіткого виводу Мамдані з вхідними лінгвістичними змінними S_m (механічний ресурс), S_k – комутаційний ресурс, IS – стан ізоляторів і P – тиск повітря визначити без урахування технічного стану і ресурсу працездатності після ремонту дефазифіковану вихідну нечітку величину, що ідентифікує загальний спрацьований ресурс вимикача S . В [7] наведено методологію модифікації функції розподілу імовірності відмов генеральної сукупності вимикачів даного типу в частині врахування спрацьованого ресурсу вимикача на момент спостереження (рис.5).

При цьому імовірність відмови вимикача при даному значенні спрацьованого ресурсу визначається:

$$P(H'_1 / B) = \frac{p(H'_1) \cdot p(B / H'_1)}{p(H'_1) \cdot p(B / H'_1) + p(H'_2) \cdot p(B / H'_2)};$$

$$P(H'_1) = P(H'_1 / G) = \frac{F(t_2) - F(t_1)}{1 - F(t_1)};$$

де $P(H'_1)$ і $P(H'_2) = (1 - P(H'_1))$ – апіорні імовірності відмови і безвідмовної роботи вимикача на інтервалі часу Δt ; $P(B / H'_1)$ і $P(B / H'_2)$ – умовні імовірності події B (об'єкт в момент часу t_1 мав технічний стан S при настанні подій H'_1 і H'_2 відповідно). Вони визначаються згідно з [7, 9] на основі композиційного правила Заде:

$$P_p = R_p \cdot S \text{ – для умовної імовірності } P(B_1 / H'_1);$$

$$P_Q = R_Q \cdot S \text{ – для умовної імовірності } P(B / H'_2).$$

де R_p, R_Q – матриці причинно-наслідкових співвідношень.

Побудова матриць співвідношень для умовних імовірностей відмови та без відмовної роботи електрообладнання виконується за методом Сааті [3, 9]:

$$P_P = \begin{bmatrix} r_{11}^p & r_{12}^p & r_{13}^p & r_{14}^p & r_{15}^p \\ r_{21}^p & r_{22}^p & r_{23}^p & r_{24}^p & r_{25}^p \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{51}^p & r_{52}^p & \cdot & \cdot & r_{55}^p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_S^{DB} \\ \mu_S^B \\ \mu_S^C \\ \mu_S^H \\ \mu_S^{DH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_P^{DB} \\ \mu_P^B \\ \mu_P^C \\ \mu_P^H \\ \mu_P^{DH} \end{bmatrix}$$

$$P_Q = \begin{bmatrix} r_{11}^q & r_{12}^q & r_{13}^q & r_{14}^q & r_{15}^q \\ r_{21}^q & r_{22}^q & r_{23}^q & r_{24}^q & r_{25}^q \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_{51}^q & r_{52}^q & \cdot & \cdot & r_{55}^q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_S^{DB} \\ \mu_S^B \\ \mu_S^C \\ \mu_S^H \\ \mu_S^{DH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_Q^{DB} \\ \mu_Q^B \\ \mu_Q^C \\ \mu_Q^H \\ \mu_Q^{DH} \end{bmatrix}$$

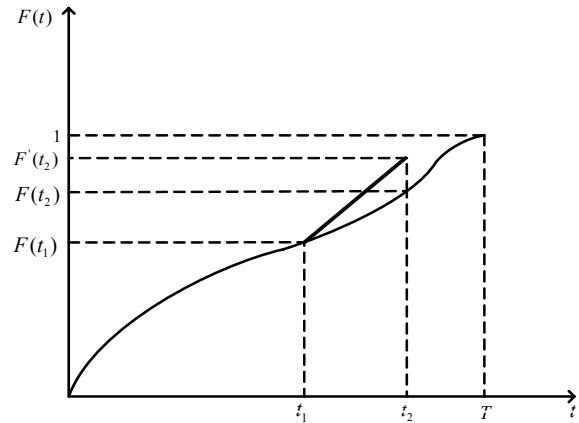


Рисунок 5 – Модифікована функція розподілу імовірності відмови обладнання

Якщо повна імовірність відмови вимикача на інтервалі часу Δt з урахуванням подій G і B дорівнює $P(H_1 / G, B)$, то значення модифікованої функції $F'(t_2)$ визначається:

$$F'(t_2) = F(t_1) + P(H_1 / G, B).$$

В якості рішення, наприклад, для $P(B / H_1')$ приймається значення, що визначається за формулою [9]:

$$P(B / H_1') = \frac{S\mu_P^{DH} + S_1\mu_P^H + S_2\mu_P^C + S_3\mu_P^B + S_4\mu_P^{DB}}{\mu_P^{DH} + \mu_P^H + \mu_P^C + \mu_P^B}, \quad (1)$$

де S, S_1, S_2, S_3, S_4 – критеріальні значення для нечітких множин загального спрацьованого ресурсу вимикача, визначених за шкалою Харінгтона [3].

В якості прикладу розглянемо визначення імовірності відмови повітряного вимикача ВВН-220-2000/25 на інтервалі часу $\Delta t=6$ міс, що знаходився в експлуатації 23 роки і здійснив кількість циклів В-В-650(допустима кількість циклів В-В-1000),а кількість комутацій-7(допустима кількість комутацій КЗ-10).Визначені з графіку для $F(t)$ для моментів часу t_1 та t_2 апіорні імовірності складають: $P(H_1')=0,06$, $P(H_2')=0,94$.

Умовна імовірність $P(B/H_1')$ визначається:

$$P_P = R_P \cdot S' = \begin{bmatrix} 0,835 & 0,138 & 0,005 & 0,004 & 0,003 \\ 0,103 & 0,778 & 0,093 & 0,04 & 0,019 \\ 0,037 & 0,062 & 0,734 & 0,112 & 0,005 \\ 0,018 & 0,015 & 0,156 & 0,755 & 0,133 \\ 0,006 & 0,007 & 0,013 & 0,089 & 0,793 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,16 \\ 0,84 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,16 \\ 0,778 \\ 0,062 \\ 0,018 \\ 0,007 \end{bmatrix}$$

Величина імовірності $P(B/H_1')$, згідно з (1), дорівнює 0,635. Аналогічним чином одержуємо величину умовної імовірності $P(B/H_2') = 0,21$. При цьому імовірність відмови вимикача при заданому значенні спрацьовання ресурсу $P(H_1'/B)$ та значення функції $F(t)$ в момент часу t_2 становлять 0,161 і 0,813 відповідно.

В табл.6 наведено результати розрахунку імовірності відмови вимикача $P(H_1'/B)$ на інтервалі часу 6 місяців без і з урахуванням рівня відновлення технічного ресурсу після ремонту при загальному спрацьованому ресурсі вимикача S на момент спостереження t_1 , рівному 0,75.

Таблиця 6 – Результати розрахунку імовірності відмови повітряного вимикача.

Параметри, що визначаються	Позначення	Номер випробування				
		1	2	3	4	5
Ресурс працездатності вимикача після ремонту	S_{np}	1	0,95	0,91	0,88	0,85
Загальний спрацьований ресурс вимикача при ідеальному відновленні	S	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Імовірність відмови вимикача без урахування/з урахуванням рівня відновлення після ремонту	$P(H_1'/B)$	0,161	0,161	0,161	0,161	0,161
		0,161	0,194	0,219	0,23	0,26
Значення функції $F(t)$ для моменту часу t_2 без урахування/з урахуванням рівня відновлення після ремонту	$F'(t_2)$	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813
		0,813	0,846	0,871	0,882	0,9

Висновки. 1. Запропоновано підхід і математичну модель для оцінки рівня відновлення ресурсу електрообладнання після ремонту, що ґрунтується на агрегуванні параметрів післяремонтних випробувань та значень ресурсу окремих функціональних вузлів.

2. Для високовольтного вимикача отримана оцінка імовірності відмови на заданому інтервалі часу з урахуванням його технічного стану на момент спостереження, історії життя та рівня відновлення ресурсу після ремонту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Task on Probabilistic Aspects of Reliability Criteria of the IEEE PES Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee (J. McCalley's chair) "Probabilistic Security Assessment for Power System Operations." - IEEE Power Engineering Society General Meeting. – 6-10 June, 2004.

2. Ситников В.Ф. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации / Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. // Электричество – 2007. - №11. – С.9-15.

3. Костерев М.В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем / Костерев М.В., Бардик Є.І. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 148 с.

4. Бардик Є.І. Нечітке моделювання технічного стану високовольтних вимикачів / Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. // НТУУ "КПІ", "Наукові вісті". –2011. – №1. –С.12–19.

5. Бардик Є.І., Костерев М.В., Литвинов В.В. Оцінка імовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – № 10 (186). – С.199-204.

6. Кухарчук В.В. Елементи теорії контролю динамічних параметрів електричних машин: [монографія] – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 1998. – 125 с.

7. Родькин Д.И. К определению послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей / Родькин Д.И., Черный А.П. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ, 2001. – Вип. 2(11). – С.40-47.

8. Земельман І.А. О классификации погрешности измерений / І.А. Земельман // Измерительная техника. – 1985. – №6. – С. 3-5.

9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. – 288 с.

10. Бардик Є.І., Костерев М.В. Спосіб оцінки післяремонтного технічного стану високовольтного вимикача по моделі об'єкта в умовах нечіткої інформації: Україна, пат. 72529 від 27.08. 2012 р.

11. Абдурахманов А.М. Влияние продолжительности эксплуатации на отказы выключателей в высоковольтных электрических сетях / Абдурахманов А.М. Мисриханов М.Ш., Шунтов А.В. // Электрические станции. – 2007. – №7. – С.59-63.

REFERENCES

1. Task on Probabilistic Aspects of Reliability Criteria of the IEEE PES Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee (J. McCalley's chair) "Probabilistic Security Assessment for Power System Operations".-IEEE Power Engineering Society General Meeting.-6-10 June, 2004.

2. Sitnikov V.F., Scopincev V.A. Probabilistic statistical approach to resource assessment of power supply equipment in operation. *Electrichestvo* [Electricity], 2007. – №11. – Pp.9-15.

3. Kosterev M.V., Bardik E.I. Questions of constructing fuzzy model of evaluation the technical conditionof of the objects of electrical systems. Kyiv: NTUUKPI, 2011. 148 p.

4. Bardik E.I., Kosterev E.I., Litvinov V.V. Fuzzy modeling of high-voltage circuit breakers technical state. Kyiv, NTUU KPI, "Science news". – 2011. – №1.– Pp.12–19.

5. E.I. Bardik, M.V. Kosterev, V.V. Litvinov. Evaluation of probability of failure of electrical equipment in driving modes of electrical system. *Zbirnyk naukovykh prats DonNTU* [DonNTU scientific papers]. Issue "Electrotechnic and energetic".2011. – № 10 (186). – Pp.199-204.

6. Kucharchuk V.V. Elements of the theory of control dynamic parameters of electrical machines. Vinnitca, UNIVERSUM. 1998. 125 p.

7. Rodkin D.I., Cherniy A.P. To define work ability after repair of asynchronous engines. Vistnyk of Kremenchugh state politechnical university: Kremenchugh:KSPU.-2001.-issue.2(11)-p.40-47.

8. Zemelman I.A. About classification of measurement errors. Measurement technic. 1985. № 6, Pp.3-5.

9. Shtovba S.D. Designing of fuzzy systems by MATLAB means. Moscow: Hot Line–Telecom, 2007. 228p.

10. Bardik E.I., Kosterev M.V. Method evaluation after repair technical state of high-voltage breaker on the object modeling fuzzy information: Patent of Ukraine , 72529 from 27.08.2012.

11. Abdurahmanov A.M., Misrihanov M., Shuntov A.V. Effect of operation refusals switches in high-voltage electrical networks. Power plants. 2007. №7. Pp.59-63.

Є.І. БАРДИК

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Оцінка ризику відмови високовольтного вимикача з урахуванням рівня відновлення ресурсу після ремонту. В статті розглянуто підхід і нечітка ієрархічна математична модель для оцінки рівня відновлення ресурсу електрообладнання після ремонту, що ґрунтується на агрегуванні показників якості відновлення окремих елементів і функціональних вузлів та параметрів ТС об'єкта, що визначають при післяремонтних випробуваннях та вимірюваннях. Для повітряного вимикача для різних сполучень параметрів післяремонтних випробувань визначені кількісні показники ресурсу працездатності після ремонту та дана оцінка впливу його на імовірність відмови вимикача на інтервалі часу Δt .

Ключові слова: електрообладнання, технічний стан, ресурс, нечітка логіка, післяремонтне відновлення, відмова, імовірність.

E. BARDIK

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Risk Assessment of High-Voltage Circuit Breaker Failure with Taking into Account the Level Of Resource Recovery. The reliability problem analysis of power supply in modern power systems is presented in the article. The importance for power supply systems of ensuring reliable operation of high-voltage switches and development of mathematical models of an assessment of their technical condition and definition of probability of refusal on time interval is established. On the basis of the analysis of existing mathematical models of a technical condition complex assessment, the general worked resource of power supply system electrical equipment, practice of operation, the need of accounting of the after-repair resource renewal level in models of refusals. The approach, based on using hierarchical structure charts and models, is proposed to evaluate the integral indicator of resource recovery after repair of functional units and electrical unit in general. It is established that quantitative indicators of resource efficiency after repair of electrical equipment should be appointed by expert methods using fuzzy sets theory. The hierarchical block diagram and fuzzy mathematical model for the assessment of after-repair resource recovery level of electrical equipment, based on the aggregation of quality restoration of individual elements and functional components and technical parameters of the object, determined in after repair tests and measurements, is proposed in the article. The block diagram of fuzzy logic and the corresponding mathematical model is designed to determine the after-repair resource recovery level of air circuit breaker. The after-repair life resources of individual functional units (pneumatic system, arc quenching device control cabinet and drive) of air circuit breaker are defined, based on the results after-repair measurements and tests. The methodology of modifications of failure probability distribution of the general number of circuit breakers of certain type, taking into account the worked resource of circuit breaker at the moment of observation and the level of after-repair resource recovery level. It is obtained the assessment of failure probability of BBH -22-2000/25 air circuit breaker at the time interval with a given technical state at the moment of observation without considering and taking into account after-repair resource capacity.

Keywords: electrical equipment, technical condition, resource, fuzzy logic, after-repair recovery, failure, probability.