

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.311

Є.І. Бардик, канд. техн. наук, доц.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут“, м.Київ, Україна,
e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ РІВНЯ ВІДНОВЛЕННЯ РЕСУРСУ ПІСЛЯ РЕМОНТУ

Ye.I. Bardyk, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, e-mail: kafedra_et@fea.kpi.ua

MODELLING AND ASSESSMENT OF CHANCES OF FAILURE OF POWER SYSTEMS ELECTRICAL EQUIPMENT TAKING INTO ACCOUNT THE AFTER REPAIR RESOURCE RESTORATION LEVEL

Мета. Розробка з використанням теорії нечітких множин математичних моделей оцінки ймовірності відмови електрообладнання на інтервалі часу з урахуванням технічного стану (ТС) у момент спостереження та рівня відновлення ресурсу після ремонту.

Методика. Запропонований підхід щодо визначення інтегрального показника рівня відновлення ресурсу електрообладнання енергосистем після ремонту. Розроблена математична модель для визначення ймовірності відмови електрообладнання на інтервалі часу спостереження, що ґрунтується на використанні формули Байєса, композиційного правила Заде й урахуванні спрацьованого ресурсу та рівня відновлення ресурсу після ремонту на момент спостереження.

Результати. Проведено аналіз умов функціонування сучасних електроенергетичних систем (ЕЕС) та проблем забезпечення надійності електропостачання споживачів. На основі аналізу існуючих математичних моделей комплексної оцінки технічного стану, загального спрацьованого ресурсу електрообладнання енергосистем, практики експлуатації обґрунтована необхідність урахування рівня відновлення ресурсу після ремонту в моделях відмов. Встановлено, що кількісні показники ресурсу працездатності після ремонту електрообладнання необхідно формувати експертними методами з використанням теорії нечітких множин. Запропонована ієрархічна структурна схема та нечітка математична модель для оцінки рівня відновлення ресурсу електрообладнання після ремонту, що ґрунтується на агрегуванні показників якості відновлення окремих елементів і функціональних вузлів та параметрів технічного стану об'єкта, які визначають при післяремонтних випробуваннях та вимірюваннях.

Наукова новизна. Адекватне моделювання електрообладнання енергосистем для оцінки ймовірності відмови з урахуванням реального технічного стану та рівня відновлення ресурсу після ремонту на момент спостереження, що дає можливість підвищувати точність визначення кількісних показників ризику експлуатації підсистем ЕЕС.

Практична значимість. Створені математичні моделі та програмне забезпечення для оцінки ймовірності відмов електрообладнання дозволяють визначати кількісні показники ризику виникнення аварій у складних електроенергетичних системах при відмовах електрообладнання.

Ключові слова: відмова, ресурс, нечіткі множини, ймовірність, електрообладнання, ризик, відновлення

Постановка проблеми. Статистичний аналіз аварійності в електроенергетичних системах України та інших промислово розвинених країн показує, що існує стійка тенденція до підвищення кількості по-

рушень електропостачання відповідальних енергетичних об'єктів, а іноді й значних територій, що супроводжуються негативними соціальними, економічними та екологічними наслідками [1, 2].

Зростання інтенсивності технологічних порушень і важкості наслідків, у першу чергу, викликане

об'єктивно існуючим старінням і вичерпанням ресурсу працездатності електрообладнання, несприятливим погіршенням кліматичних умов, більш напруженими умовами роботи персоналу та іншими причинами організаційного характеру.

У зв'язку з цим для електроенергетичних систем (ЕЕС) важливого значення набувають питання ефективної організації експлуатації та управління надійністю електропостачання для споживачів електроенергії та обґрунтування й впровадження заходів, направлених на запобігання виникнення аварій.

В умовах об'єктивно існуючого зниження надійності електропостачання споживачів, зумовленого перш за все значним старінням парку електрообладнання, зростає роль достовірності оцінки показників надійності електрообладнання та підсистем ЕЕС протягом заданого інтервалу часу. Рівень зниження надійності електропостачання споживачів доцільно оцінювати показником ризику [1, 3], що включає в себе ймовірність відмов електрообладнання та їх наслідки.

Значна частка (близько 90%) аварій, що виникають у сучасних ЕЕС, припадає на аварії в електричних мережах, переважно, внаслідок відмов силового та комутаційного обладнання, пристроїв релейного захисту та автоматики. При цьому важливим є забезпечення надійного відключення електрообладнання та недопущення розвитку аварії в ЕЕС. Задачі локалізації аварій в сучасних електричних системах і підстанціях, у першу чергу, виконують високовольтні вимикачі. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких, у значній мірі, залежить стійкість забезпечення електропостачання споживачів як у нормальних, так і в аварійних режимах. Тому задача розробки математичних моделей оцінки технічного стану, прогнозування ресурсу працездатності та визначення ймовірності відмови електрообладнання, зокрема, високовольтних вимикачів на інтервалі часу, є актуальною задачею.

Виділення невирішеної проблеми. Існуюча на сьогодні система технічного та ремонтного обслуговування з чіткою регламентацією термінів і видів планових ремонтів не здатна забезпечити надійну роботу електрообладнання з вичерпаним терміном служби. Зношене електрообладнання після чергового ремонту може просто не допрацювати до наступного за планом ремонту. За кордоном уже тривалий час з успіхом використовують безперервний контроль (моніторинг) технічного стану обладнання під робочою напругою, що дає можливість своєчасно виявляти несправності та перейти до системи виконання ремонтів „за станом“ [2, 4–5]. Але такі системи є дуже дорогими, а їх застосування виправдане тільки для відповідальних об'єктів. У зв'язку з цим актуальними є питання контролю та діагностування технічного стану електрообладнання для забезпечення своєчасного виявлення дефектів і неполадок як в режимі реального часу, так і при проведенні планових і позапланових ремонтів.

Аналіз існуючих методів і засобів технічного діагностування, що на сьогодні використовуються у віт-

чизняних енергосистемах, показує, що як в теоретичному, так і в практичному плані існує необхідність його суттєвого розвитку, зокрема, у двох напрямках:

- технічне діагностування повинно не тільки виявляти наявність дефектів в електрообладнанні, але й визначати ресурс обладнання;

- технічне діагностування повинне агрегувати показники стану обладнання, тобто переходити від показників стану елементів обладнання до оцінки стану функціональних вузлів, від вузлів – до стану агрегатів, від агрегатів – до стану обладнання енергетичних підприємств.

Більшість енергетичних підприємств періодично проводять обстеження електрообладнання для одержання повноцінної інформації щодо їх технічного стану, визначення спрацьованого та прогнозування залишкового ресурсу. Якими б досконаліми не були системи технічного діагностування, що використовуються на працюючому електрообладнанні, одержати комплексну оцінку технічного стану об'єкта можна тільки шляхом проведення поточних, середніх і капітальних ремонтів (електрообладнання при цьому виводять з експлуатації).

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 технічного стану (ТС) і ресурсу окремих вузлів необхідна, оскільки впливає на загальний технічний ресурс об'єкта S , термін служби $T_{св}$, частоту відмов і витрати, що пов'язані з аварійними відмовами електрообладнання.

У першому наближенні величину рівня відновлення ресурсу можна визначити відношенням середнього терміну безвідмовної роботи електрообладнання, що вийшло з ремонту, до аналогічної характеристики для нового електрообладнання. Але не завжди в сучасних енергосистемах така порівняльна статистика існує. 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 як окремих елементів, функціональних вузлів, так і електрообладнання в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Задачі оцінки технічного стану, визначення залишкового ресурсу та ймовірності відмови силового та комутаційного електрообладнання електроенергетичних систем на певному інтервалі часу розглядалися в низці робіт. У [6] запропоновані моделі оцінки ТС електрообладнання за результатами окремих вимірювань і випробувань, але вони не дозволяють визначити спрацьований і залишковий ресурс об'єкта та, відповідно, ймовірність відмови.

У [7] представлена модель комплексної оцінки ТС електрообладнання, що побудована на основі нечіткої логіки та ґрунтується на агрегуванні показників ТС окремих функціональних вузлів, дозволяє визначити

загальний спрацьований ресурс, але в ній не визначається ймовірність відмови на певному інтервалі часу. У математичній моделі вимикача [3], з використанням функції розподілу ймовірності відмов $F(t)$, модифікованої до реальних умов експлуатації (враховується загальний спрацьований технічний ресурс вимикача), визначається ймовірність відмови на інтервалі часу Δt , але не враховується рівень ресурсу працездатності після ремонту. Для врахування найбільш суттєвих факторів, що впливають на ризик відмови електрообладнання, необхідна розробка комплексних математичних моделей, в яких враховувався би вплив реального ТС, спрацьованого ресурсу та рівня відновлення після ремонту об'єкта на ймовірність його відмови.

Виклад основного матеріалу. 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, що повинні задовольняти наступним вимогам [5, 8]: бути ідентичними параметрам, що враховуються при проектуванні; відображати основні експлуатаційні характеристики електрообладнання; щоби був простий зв'язок між зміненням загального ресурсу працездатності електрообладнання та зміною 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 й одиниці електрообладнання в цілому доцільно здійснювати на основі використання багаторівневих ієрархічних структурних схем і математичних моделей [9].

На рис. 1 зображена спрощена ієрархічна структурна схема моделі, що ілюструє залежність стану кожного елемента від їх 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 та 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 $A_{in} \leq A_i \leq A_{i\text{дон}}$ представимо лінгвістичною змінною "Величина параметру ТС електрообладнання" з 5-ма терм-множинами ($T_{A_i}^{DB}, T_{A_i}^H, T_{A_i}^C,$

$T_{A_i}^B, T_{A_i}^{LB}$) – дуже низьке, низьке, середнє, високе, дуже високе значення параметра ТС відповідно. Графіки змінення функцій належності терм-множинам лінгвістичної змінної A_i представлені на рис. 2. У табл. 1 наведена класифікація поточних значень параметрів технічного стану A_i елемента як критерій розбиття повної множини їх значень на нечіткі множини.

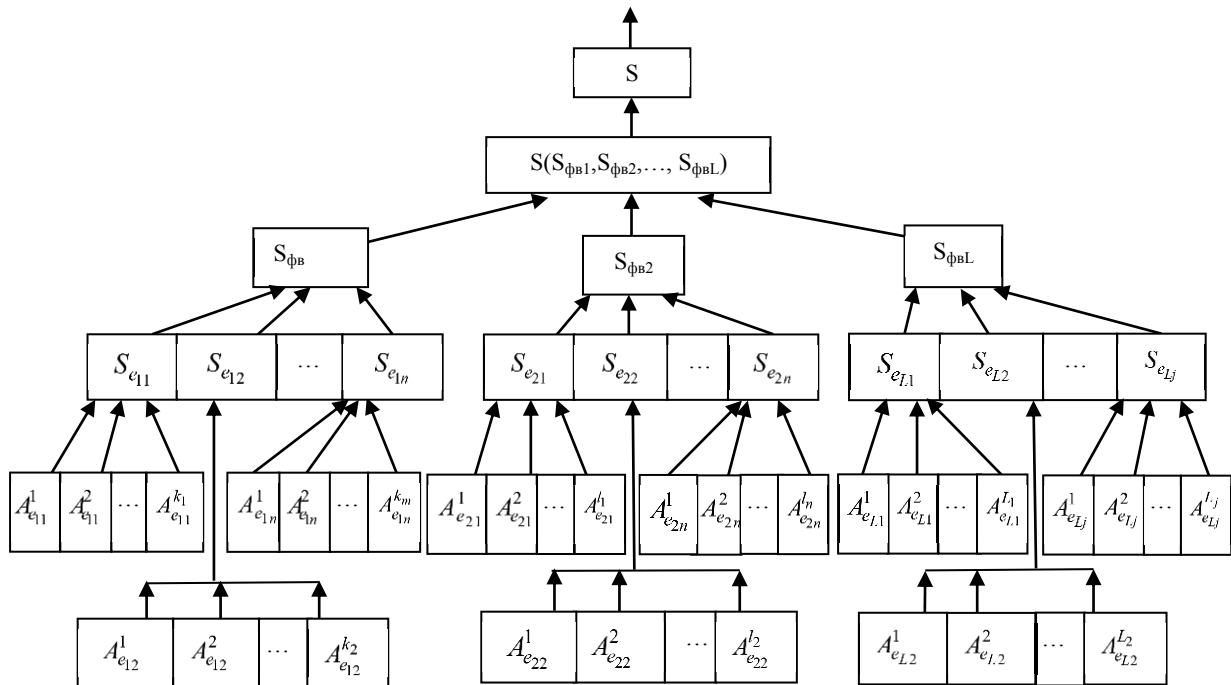


Рис. 1. Загальна ієрархічна структурна схема моделі визначення показника відновлення ресурсу електрообладнання: A_i – параметри технічного стану після ремонту електрообладнання; S_e – ресурс працездатності після ремонту елементів електрообладнання; $S_{фв}$ – ресурс працездатності після ремонту функціональних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

Класифікація поточних значень параметрів технічного стану A_i

№ 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	$T_{A_1}^{DH}$	$T_{A_1}^H$	$T_{A_1}^C$	$T_{A_1}^B$	$T_{A_1}^{DB}$
2	A_2	$T_{A_2}^{DH}$	$T_{A_2}^H$	$T_{A_2}^C$	$T_{A_2}^B$	$T_{A_2}^{DB}$
...
N	A_N	$T_{A_N}^{DH}$	$T_{A_N}^H$	$T_{A_N}^C$	$T_{A_N}^B$	$T_{A_N}^{DB}$
	S_e	$T_{S_e}^{DH}$	$T_{S_e}^H$	$T_{S_e}^C$	$T_{S_e}^B$	$T_{S_e}^{DB}$

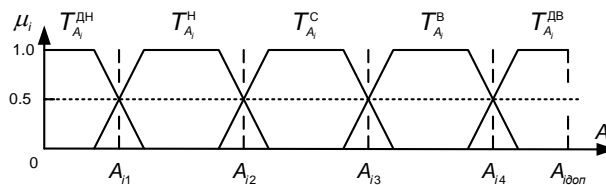


Рис. 2. Функції належності нечітких термів лінгвістичних змінних параметрів технічного стану електрообладнання

Рівні відновлення ресурсу працездатності елемента S_{ei} , функціонального вузла $S_{\phi vj}$ та одиниці електрообладнання в цілому S , що змінюються в діапазоні від 0 до 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 та об’єкта в цілому наведено на рис. 3 а–в.

У табл. 2 і 3 наведено класифікацію поточних значень ресурсу працездатності після ремонту елемента S_{ei} , функціонального вузла $S_{\phi vj}$, як критерій розбиття повної множини значень на нечіткі множини, причому у клітинах табл. 2, 3 стоять трапецієвидні числа, що характеризують відповідні функції належності.

Математична модель для визначення рівня відновлення ресурсу працездатності об’єкта, що, у відповідності до ієрархічної структурної схеми (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 та ресурсів працездатності елементів S_{ei} і функціональних вузлів $S_{\phi vj}$, що визначаються після ремонту; B – набір якісних або 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 $S_{\phi vj}$ після ремонту над іншими ($A_j, S_{ej}, S_{\phi vj}$) відповідно до одного рівня ієрархії

$$M = \{A_i(\varphi) A_j; S_{ei}(\varphi) S_{ej}; S_{\phi vj}(\varphi) S_{\phi vj} \mid \varphi \in (\succ, \approx)\},$$

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

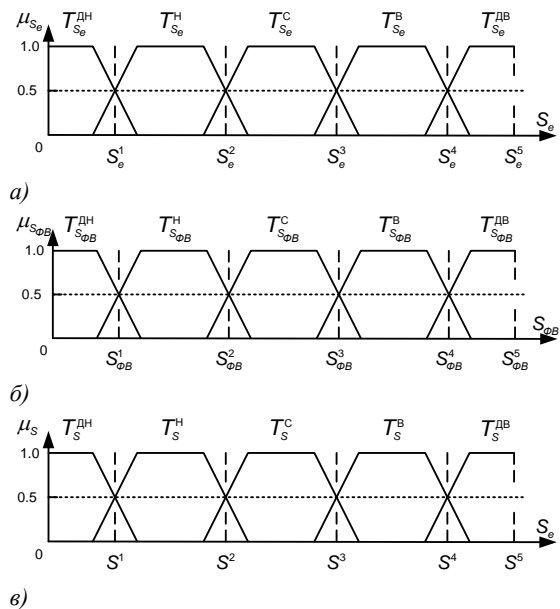


Рис. 3. Функції належності нечітких термів лінгвістичних змінних “Рівень відновлення ресурсу після ремонту”: а – елемента; б – функціонального вузла; в – одиниці електрообладнання в цілому

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}	$T_{S_{e_2}}^{DH}$	$T_{S_{e_2}}^H$	$T_{S_{e_2}}^C$	$T_{S_{e_2}}^B$	$T_{S_{e_2}}^{DB}$
...
M	S_{e_M}	$T_{S_{e_M}}^{DH}$	$T_{S_{e_M}}^H$	$T_{S_{e_M}}^C$	$T_{S_{e_M}}^B$	$T_{S_{e_M}}^{DB}$
$S_{\Phi B}$		$T_{S_{\Phi B}}^{DH}$	$T_{S_{\Phi B}}^H$	$T_{S_{\Phi B}}^C$	$T_{S_{\Phi B}}^B$	$T_{S_{\Phi B}}^{DB}$

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	$S_{\Phi B_1}$	$T_{S_{\Phi B_1}}^{DH}$	$T_{S_{\Phi B_1}}^H$	$T_{S_{\Phi B_1}}^C$	$T_{S_{\Phi B_1}}^B$	$T_{S_{\Phi B_1}}^{DB}$
2	$S_{\Phi B_2}$	$T_{S_{\Phi B_2}}^{DH}$	$T_{S_{\Phi B_2}}^H$	$T_{S_{\Phi B_2}}^C$	$T_{S_{\Phi B_2}}^B$	$T_{S_{\Phi B_2}}^{DB}$
...
L	$S_{\Phi B_L}$	$T_{S_{\Phi B_L}}^{DH}$	$T_{S_{\Phi B_L}}^H$	$T_{S_{\Phi B_L}}^C$	$T_{S_{\Phi B_L}}^B$	$T_{S_{\Phi B_L}}^{DB}$
S		T_S^{DH}	T_S^H	T_S^C	T_S^B	T_S^{DB}

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

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

де $\{S_{ei}\}, \{S_{\Phi ei}\}$ – 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.

У першому наближенні вплив кожного параметра A_i на показник якості ремонту елемента S_{ei} , функціонального вузла $S_{\Phi ei}$, на ресурс працездатності об’єкта S можна врахувати за допомогою деякого коефіцієнта значущості K_i , для оцінки якого необхідно розмістити всі параметри за порядком зниження значущості: $K_1 > K_2 > \dots > K_N$, де N – кількість параметрів технічного стану елементів, або ФВ. У цьому випадку коефіцієнт значущості (впливу) i -го параметру можна визначити за правилом Фішберна [9]

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

Якщо в систему разом з перевагами входять відношення байдужості, то набір ваг K_i Фішберна та ва-

говий коефіцієнт i -го фактора впливу P_i визначаються так

$$K_{i-1} = \begin{cases} K_i, F_{i-1} \approx F_i \\ K_{i+1}, F_{i-1} \succ F_i \\ K_N = 1, i = N..2 \end{cases};$$

$$P_i = \frac{K_i}{K}; K = \sum_{i=1}^N K_i,$$

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

Остаточно, інтегральні показники рівня відновлення після ремонту елементів S_e і функціональних вузлів $S_{\Phi e}$ на основі запропонованої нечіткої моделі визначаються з формул

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

$$S_{\Phi e} = \sum_{j=1}^5 S_{\Phi e}^j \sum_{i=1}^M P_i \mu_{ij}(S_{ei}).$$

Розглянемо випадок, коли визначення ресурсу працездатності $S_e, S_{\Phi e}, S$ 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 $A_i, S_{ei}, S_{фej}$) можна поставити у відповідність вектора із п'яти значень відповідних функцій належності класифікатора

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

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

При цьому інтегральний показник рівня відновлення ресурсу об'єкта, що 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, що характеризує величину ресурсу 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 ймовірність відмови на певному 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.

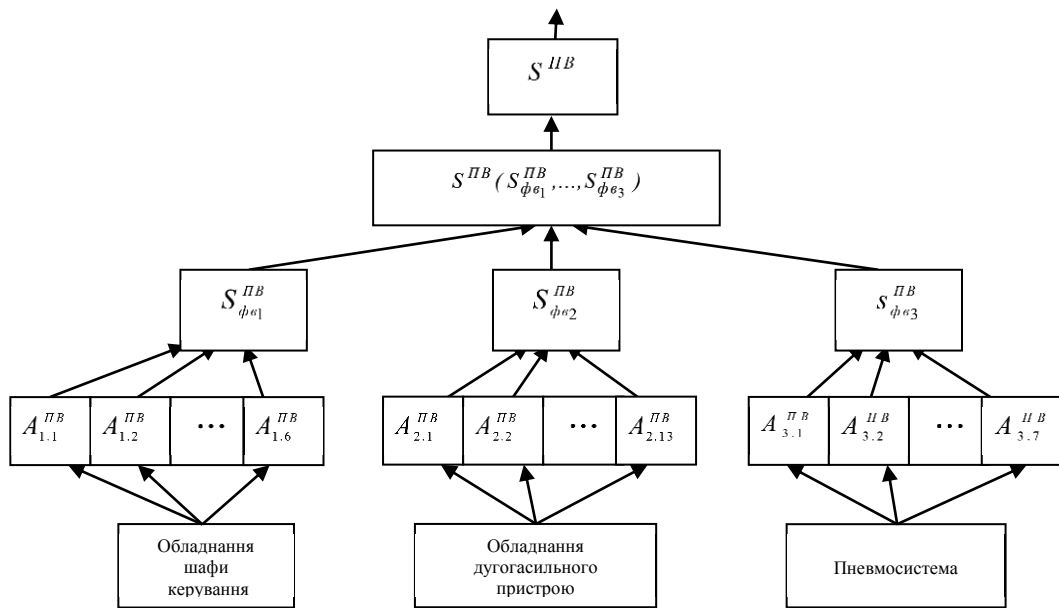


Рис. 4. Ієрархічна схема нечіткого логічного висновку для визначення рівня відновлення ресурсу після ремонту повітряного вимикача

Для різних сполучень параметрів, що визначаються при післяремонтних вимірюваннях і випробуваннях, у табл. 4 наведено результати визначення за запропонованою моделлю значень інтегрального значення ресурсу працездатності повітряного вимикача після ремонту $S_{np}^{те}$.

Таблиця 4

Результати розрахунку ресурсу повітряного вимикача після ремонту

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

З точки зору реальної практики експлуатації важливо знати як величину ймовірності відмови вимикача на інтервалі часу Δt , так і термін вичерпання ре-

сурсу працездатності. Останні у значній мірі визначаються величиною спрацьованого технічного ресурсу вимикача $S_{сн}$, що, у свою чергу, залежить від рівня відновлення загального технічного ресурсу працездатності S після ремонту.

У [3,7] представлена нечітка модель високовольтного повітряного вимикача, що 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 та ресурсу працездатності після ремонту дефазифіковану вихідну нечітку величину, що ідентифікує загальний спрацьований ресурс вимикача S . У [3] наведено методологію модифікації функції розподілу ймовірності відмов генеральної сукупності вимикачів даного типу в частині врахування спрацьованого ресурсу вимикача на момент спостереження (рис. 5).

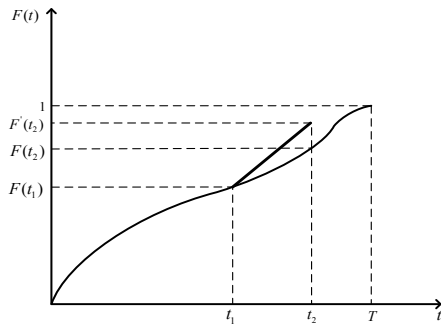


Рис. 5. Модифікована функція розподілу ймовірності відмови обладнання

При цьому ймовірність 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 ймовірності відмови та безвідмовної роботи вимикача на інтервалі часу Δt ; $P(B / H'_1)$ і $P(B / H'_2)$ – умовні ймовірності події B (об'єкт у 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: $P_p = R_p \cdot S$ – для умовної ймовірності $P(B_1 / H'_1)$; $P_Q = R_Q \cdot S$ – для умовної ймовірності $P(B / H'_2)$, де R_p, R_Q – матриці причинно-наслідкових співвідношень.

Побудова матриць співвідношень для умовних ймовірностей відмови та безвідмовної роботи електрообладнання виконується за методом Сааті [3,10]

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

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

Якщо повна ймовірність 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 [3,10]

$$P(B / H'_1) = \frac{\underline{S}\mu_P^{DH} + S_1\mu_P^H + S_2\mu_P^C + S_3\mu_P^B + S_4\mu_P^{DB}}{\mu_P^{DH} + \mu_P^H + \mu_P^C + \mu_P^B}, \quad (1)$$

де $\underline{S}, S_1, S_2, S_3, S_4$ – критеріальні значення для нечітких множин загального спрацьованого ресурсу вимикача, визначені за шкалою Харінгтона [3,9].

В якості прикладу розглянемо визначення ймовірності відмови повітряного вимикача ВВН-220-2000/25 на інтервалі часу $\Delta t = 6$ міс, що знаходився в експлуатації 23 роки та 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 ймовірності складають $P(H'_1) = 0,06$ та $P(H'_2) = 0,94$.

Умовна ймовірність $P(B / H'_1)$ 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 ймовірності $P(B / H'_1)$, згідно з (1), дорівнює 0,635. Аналогічним чином одержуємо величину умовної ймовірності $P(B / H'_2) = 0,21$. При цьому ймовірність відмови вимикача при заданому значенні спрацьованого ресурсу $P(H'_1 / B)$ та значення функції $F(t)$ у момент часу t_2 становлять 0,161 і 0,813 відповідно.

У таблиці 5 наведено результати розрахунку ймовірності 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.

Висновки та перспективи розвитку роботи. Запропоновано підхід для побудови комплексної математичної моделі оцінки ризику відмови силового та комутаційного обладнання ЕЕС, в якій враховується вплив реального ТС, спрацьованого ресурсу працездатності та рівня відновлення ресурсу після ремонту. Розроблена ієрархічна структурна схема та нечітка модель для оцінки ресурсу працездатності об'єкта після ремонту. Наведена методологія модифікації функції розподілу ймовірності відмов генеральної сукупності одиниць електрообладнання даного типу на основі врахування загального спрацьованого ресурсу та рівня відновлення після ремонту на момент спостереження. На основі отриманих результатів оцінки ймовірності відмов на заданому інтервалі часу спостереження електрообладнання, зокрема для високовольтних повітряних вимикачів, показана необхідність урахування рів-

ня відновлення ресурсу його працездатності після ремонту. Одержані результати математичного моделювання для визначення ймовірності відмов електрообладнання енергосистем є базовими для розроблювальних комплексів програм оцінки ризику виникнення

аварій у складних ЕЕС, що містять системи електропостачання відповідальних потенційно небезпечних об'єктів: підприємств хімічної промисловості, гірничорудної промисловості та систем власних потреб теплових та атомних електростанцій.

Таблиця 5

Результати розрахунку ймовірності відмови повітряного вимикача

Параметри	Поз.	Номер випробування				
		1	2	3	4	5
Ресурс працездатності вимикача після ремонту	S_{np}^{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
Ймовірність відмови вимикача без урахування / з урахуванням рівня відновлення після ремонту	$P(H'/B)$	$\frac{0,161}{0,161}$	$\frac{0,161}{0,194}$	$\frac{0,161}{0,219}$	$\frac{0,161}{0,23}$	$\frac{0,161}{0,26}$
Значення функції F(t) для моменту часу t_2 без урахування / з урахуванням рівня відновлення після ремонту	$F'(t_2)$	$\frac{0,813}{0,813}$	$\frac{0,813}{0,846}$	$\frac{0,813}{0,871}$	$\frac{0,813}{0,882}$	$\frac{0,813}{0,9}$

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

Sitnikov, V.F. and Skopintsev, V.A. (2007), “Probabilistic and statistical approach to resource assessment of power supply equipment in service”, *Electricity*, no. 11, pp. 9–15.

3. Бардик Є.І. Оцінка ймовірності відмови електрообладнання при керуванні режимами електричної системи: зб. праць V міжнародної науково-технічної конференції „Керування режимами роботи об’єктів електричних та електромеханічних систем – 2011“, м.Святогорськ / Є.І. Бардик, М.В. Костерев, В.В. Литвинов – 2011. – С. 199–204.

Bardyk, E.I., Kosterev, M.V. and Litvinov, V.V. (2011), “Assessment of the probability of failure of electrical equipment in the electrical system management mode”, *Proc. 5th Int. Scientific and Technical Conference “Managing objects modes of electrical and electromechanical systems”*, Svyatohorsk, 2011, pp. 199–204.

4. Назарычев А.Н. Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / Назарычев А.Н., Андреев Д.А. – Иваново: ИГСУ, 2005. – 224 с.

Nazarychev, A.N. and Andreev, D.A. (2005), *Metody i matematicheskiye modeli kompleksnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya*, [Methods and Mathematical Models of Complex Technical Condition Assessment of Electrical Equipment], Ivanovo, Russia.

5. Кухарчук В.В. Элементы теории контроля динамичных параметров электрических машин: монография / Кухарчук В.В. // УНІВЕРСУМ – Вінниця, 1998. – 125 с.

Kukharchuk, V.V. (1998), *Elementy teorii kontroliu dynamichnykh parametriv elektrychnykh mashyn* [Elements of Theory of Control of Dynamic Parameters of Electric Machines], Universum, Vinnytsya, Ukraine.

6. Давиденко И.В. Структура диагностической и информационной системы оценки состояния высоковольтного оборудования / И.В. Давиденко, В.П. Голубев, В.И. Комаров // *Электрические станции*. – 1997. – № 6. – С. 25–27.

Davydenko, I.V., Golubev, V.P. and Komarov, V.I. (1997), “Structure of the diagnostic and assessment of information system of high voltage equipment”, *Electric Station*, no. 6, pp. 25–27.

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

Bardyk, E.I., Kosterev, M. V., Litvinov, V.V. (2011), “Fuzzy modeling of high-voltage circuit breakers technical state”, *Naukovi visti*, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, no. 1, pp. 12–19.

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

Rodkin, D.I. and Chernyi, A.P. (2001), “About evaluation of postrepair efficiency of induction motors”, *Visnyk kremenchutskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu*, Vol.2, no. 11, pp. 40–47.

9. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / Ротштейн А.П. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

Rothstein, A.P. (1999), *Intelectualnye tekhnologii identifikacii: nechetkaya logika, geneticheskie algoritmy, neironnye seti*, [Intellectual Identification Technologies:

Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, Neural Networks], Universum, Vinnytsya, Ukraine.

10. Ивченко В.П. Теоретические основы информационно-статистического анализа сложных систем / Ивченко В.П., Мартищенко Л.А., Монастирський М.Л. – СПб.: Лань, 1997. – 320 с.

Ivchenko, V.P., Martischenko, L.A. and Monastirsky, M.L. (1997), *Teoreticheskiye osnovy informaciono-statisticheskogo analiza slozhnyh sistem* [Theoretical Foundations of Information and Statistical Analysis of Complex Systems], Lan, St. Petersburg, Russia.

Цель. Разработка с использованием теории нечетких множеств математических моделей оценки вероятности отказа электрооборудования на интервале времени с учетом технического состояния (ТС) в момент наблюдения и уровня восстановления ресурса после ремонта.

Методика. Предложен подход для определения интегрального показателя уровня восстановления ресурса электрооборудования энергосистем после ремонта. Разработана математическая модель для определения вероятности отказа электрооборудования на интервале времени наблюдения, которая основывается на использовании формулы Байеса, композиционного правила Заде, учете сработавшего ресурса и уровня восстановления ресурса после ремонта на момент наблюдения.

Результаты. Выполнен анализ условий функционирования современных электроэнергетических систем (ЭЭС) и проблемы обеспечения надежности электроснабжения потребителей. На основе анализа существующих математических моделей комплексной оценки технического состояния, общего сработавшего ресурса электрооборудования ЭЭС, практики эксплуатации обоснована необходимость учета уровня восстановления ресурса после ремонта в моделях отказа. Установлено, что количество показателей ресурса работоспособности после ремонта электрооборудования необходимо формировать экспертными методами с использованием теории нечетких множеств. Предложена иерархическая структурная схема и нечеткая математическая модель для оценки уровня восстановления ресурса электрооборудования после ремонта, которая основывается на агрегировании показателей качества восстановления отдельных элементов, функциональных узлов и параметров технического состояния объекта, которые определяют при послеремонтных испытаниях и измерениях.

Научная новизна. Адекватное моделирование электрооборудования энергосистем для оценки вероятности отказа с учетом реального технического состояния и уровня восстановления ресурса после ремонта на момент наблюдения, что дает возможность повысить точность определения количественных показателей риска эксплуатации подсистем ЭЭС.

Практическая значимость. Созданные математические модели и программное обеспечение для оценки вероятности отказа электрооборудования позволяют определять количественные показатели

риска возникновения аварий в сложных ЭЭС при отказах электрооборудования.

Ключевые слова: отказ, ресурс, нечеткие множества, вероятность, электрооборудование, риск, восстановление

Purpose. Development of mathematical models of assessment of failure chances of electric equipment on time interval taking into account the technical condition (TC) at the time of supervision and level of restoration of a resource after repair with the use of fuzzy-set theory.

Methodology. Approach for definition of an integrated indicator of level of restoration of a resource of electric equipment of power supply system after repair was offered. The mathematical model has been developed for assessment of chances of failure of electric equipment on an interval of time of supervision which is based on the formula of Bayes, the compositional rule of Zadeh, the accounting of the worked resource and level of resource restoration after repair at the time of supervision.

Findings. The analysis of operating conditions of modern electric power systems (EPS) and a problem of ensuring reliability of power supply of consumers were made. On the basis of the analysis of existing mathematical models of a complex assessment of a technical condition, the general worked resource of electrical systems' equipment, practice of operation, the need of the accounting of restoration level of a resource after repair in refusal models was proved. We have established that the quantity of indicators of a resource of working capacity after repair of electric equipment needs to be formed by expert methods with use of fuzzy-set theory. The hierarchical block diagram and indistinct mathematical model for an assessment of restoration resource level of electric equipment after repair which is based on aggregation of indicators of quality of restoration of separate elements, functional units and parameters of technical condition of object, defined in postrepair tests and measurements has been offered.

Originality. Academic novelty of the offered method lies in adequate modeling of electric equipment of power supply systems for an assessment of chances of failure taking into account a real technical condition and level of restoration of a resource after repair at the time of supervision that gives the chance to increase the accuracy of definition of quantitative indices of risk of operation of EPS subsystems.

Practical value. The mathematical models created and the software for an assessment of chances of failure of electric equipment allows defining quantitative indices of accidents risk in complex EPS in the case of electric equipment failure.

Keywords: failure, resource, fuzzy-sets, probability, electric equipment, risk, restoration

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук М.В. Костеревим. Дата надходження рукопису 19.07.13.