

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.311

Є.І. Бардик, М.В. Костерев, В.В. Литвинов

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Вступ

В умовах значного старіння парку електрообладнання, що відбувається в Україні та інших промислово розвинених країнах, обмеженості матеріальних ресурсів для інвестиційних вкладень, зниження запасів міцності в електрообладнанні останніх поколінь, а також значної вірогідності роботи електрообладнання за межами нормованих параметрів гостро стоїть питання оцінки і прогнозування технічного стану і залишкового ресурсу, ступеня ризику експлуатації електрообладнання за межами нормованого терміну служби та при наявності дефекту, визначення ризику зниження надійності електропостачання споживачам при відмовах електрообладнання.

Значна частка (близько 90 %) аварій, які виникають у сучасних електроенергетичних системах (ЕЕС), припадає на аварії в електричних мережах. Функції локалізації аварій в ЕЕС і підстанціях виконують насамперед високовольтні вимикачі. Вони належать до найбільш важливих комутаційних апаратів, від надійності функціонування яких значною мірою залежить стійкість забезпечення електропостачанням споживачів як у нормальних, так і в аварійних режимах. Тому задача розробки математичних моделей оцінки та прогнозування технічного стану і ресурсу високовольтних вимикачів є актуальною.

У [1–3] запропоновано ряд методів і моделей оцінки технічного стану і кількісного визначення ресурсу високовольтних вимикачів, за допомогою яких визначаються окремо складові ресурсу, зокрема механічного і комутаційного. Більшість існуючих традиційних моделей оцінки технічного стану і ресурсу вимикачів не дають можливості здійснити комплексну оцінку їх технічного стану внаслідок складності одержання детермінованої математичної залежності між складовими механічного та комутаційного ресурсу й об'єктивно існуючої неповноти і нечіткості інформації щодо відключення струмів короткого замикання та загальної кількості комутацій, виконаних вимикачем.

Постановка задачі

Мета статті – розробка з використанням апарату нечітких множин математичних моделей комплексної оцінки технічного стану високовольтних вимикачів енергосистем, які ґрунтуються на агрегуванні значень комутаційного і механічного ресурсів, та ідентифікація параметрів функцій належності нечітких моделей високовольтних вимикачів різних типів для експертних систем оцінки ризику зниження надійності електропостачання споживачам підсистем ЕЕС при відмовах електрообладнання.

Нечітка модель високовольтного вимикача

Завдання комплексної оцінки технічного стану високовольтних вимикачів належать до категорії погано сформалізованих і слабо структурованих задач внаслідок таких факторів:

- наявності різномірної вхідної інформації (кількісні і якісні значення змінних), неповноти інформації, різночасності вимірювань параметрів об'єкта;
- невизначеності, яка зумовлена неможливістю адекватного математичного опису процесів внаслідок вимірювань змінних стану;
- недостатності ретроспективних даних про експлуатацію вимикачів та ін.

Ці об'єктивно існуючі умови функціонування вимикачів енергосистем викликають необхідність використання нечітких моделей вимикачів, в яких можна подати в єдиній формі різномірну інформацію про об'єкт, включаючи і суб'єктивну інформацію експертів.

Достеменність рішень, які одержують на основі нечітких моделей об'єкта, значною мірою залежить від форми та параметрів функцій належності вхідних даних і вихідних лінгвістичних змінних.

У зв'язку з цим важливо визначити параметри функцій належності нечіткої моделі високовольтного вимикача, використовуючи наявні експериментальні статистичні дані (вибірki для навчання), які зв'язують вхідні та вихідні нечіткі змінні.

Реально на практиці дуже рідко вдається одержати експериментальні статистичні дані щодо функціонування обладнання, тому актуальною задачею є також створення бази даних функцій належності нечітких моделей однотипних вимикачів, які можна використати для конкретної одиниці обладнання, якщо для нього немає даних статистичних вибірок.

Електрообладнання енергосистем розглянемо як об'єкт з k входами і одним виходом.

В узагальненому вигляді нечітка модель об'єкта F має таку структуру [4]:

- функції належності вхідних і вихідних змінних $\mu(p)$;
- бази нечітких правил “якщо..., то...” з ваговими коефіцієнтами w ;
- механізм нечіткого висновку, який використовує правила “якщо..., то...” для відображення вхідних нечітких множин у нечітку вихідну множину M ;
- метод дефазифікації D .

На універсальних множинах вхідних змінних $X_i = [\underline{x}_i, \bar{x}_i]$, $i = \overline{1, k}$, і вихідної змінної $Y = [\underline{y}, \bar{y}]$ визначимо лінгвістичні змінні A_i і S .

Введемо множини значень лінгвістичних змінних:

- $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{iq_i}\}$, $i = \overline{1, k}$, – терм-множини вхідних лінгвістичних змінних;
- $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ – терм-множини вихідної лінгвістичної змінної.

Тоді вихідна нечітка множина S визначається з виразу

$$S = F(\mu(p), w, M, D, A).$$

Для заданих базису нечітких правил, механізму нечіткого висновку та методу дефазифікації значення вихідної змінної Y' буде залежати від вектора параметрів функцій належності P , вагових коефіцієнтів нечітких правил w і вектора вхідних змінних X' :

$$Y' = F(P, w, X').$$

Припустимо, що одержано експериментальні дані або розрахунково-модельні статистичні вибірки, які зв'язують вектор вхідних змінних X' і вихідну змінну Y' . Тоді задача параметричної ідентифікації нечіткої моделі об'єкта полягає в тому [4–6], щоб знайти такий вектор (P, w) , який забезпечує мінімальне значення середньоквадратичної нев'язки:

$$\sum_{i=1}^{M_k} (Y'_i - F(X'_i, P, w))^2 = \min,$$

де M_k – об'єм вибірки вхідних і вихідних змінних, яка складається з фіксованих значень.

Працездатність вимикача визначається переважно двома характеристиками – комутаційним ресурсом $R_{\text{ком}}$ і механічним ресурсом $R_{\text{мех}}$.

Згідно з [1, 3] залишковий комутаційний ресурс вимикача після відключення n струмів короткого замикання визначається формулою

$$R_{\text{ком}} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i},$$

де $N_i = N_0 \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{к.з.}}}$; N_0 , I_{max} – допустима кількість відключень струмів короткого замикання і допустиме значення струму короткого замикання, які задаються в паспортних даних вимикача; $I_{\text{к.з.}}$ – фактичне значення струму i -го

короткого замикання, який вимикає вимикач.

Залишковий механічний ресурс обчислюється за формулою

$$R_{\text{мех}} = \frac{M_0 - M}{M},$$

де M_0 – допустиме число циклів включення-відключення; M – фактичне число виконаних вимикачем циклів включення-відключення.

За вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі вимикача візьмемо такі:

$A_1 = R_{\text{мех}}$ = <механічний ресурс вимикача> і $A_2 = R_{\text{ком}}$ = <комутаційний ресурс вимикача>, які задані на універсальних множинах $X_1 = [0, 1]$, $X_2 = [0, 1]$, відповідно.

Введемо множини значень лінгвістичних змінних (терм-множини): $A_{11} = \Pi_1$ = <початковий ресурс>, $A_{12} = \Delta_1$ = <допустимий ресурс>, $A_{13} = \text{В}_1$ = <вичерпаний ресурс>, $A_{21} = \Pi_2$ = <початковий ресурс>, $A_{22} = \Delta_2$ = <допустимий ресурс>, $A_{23} = \text{В}_2$ = <вичерпаний ресурс>.

За вихідну лінгвістичну змінну візьмемо S = <суб'єктивна ймовірність відмови вимикача>, яка задана на універсальній множині $Y = [0, 1]$ із значеннями: $S_1 = \text{В}$ = <висока ймовірність відмови>, $S_2 = \text{СВ}$ = <середньовисока ймовірність відмови>, $S_3 = \text{С}$ = <середня ймовірність відмови>, $S_4 = \text{СН}$ = <середньонизька ймовірність відмови>, $S_5 = \text{Н}$ = <низька ймовірність відмови>.

Початкові функції належності нечітких термів вхідних змінних “механічний ресурс” та “комутаційний ресурс” будемо, виходячи з таких даних.

1. Поняття “вимикач з початковим ресурсом” використовують до введених в експлуатацію нових вимикачів або вимикачів після капі-

тального ремонту до тих пір, поки вони не здійснять перше відключення струму короткого замикання або здійснять перші цикли включення-відключення, тому як середні значення нечітких термів "початковий" взято значення ресурсу, яке дорівнює одиниці.

2. Поняття "вимикач з випрацюваним ресурсом" застосовують до вимикачів, ресурс яких близький до нуля. Для механічного ресурсу це величина порядку 0,01 від початкового значення, для комутаційного ресурсу, згідно з [1], це величина, за якої при наступному відключенні струму короткого замикання випрацювання ресурсу може перевищити одиницю. Для вимикача ВВ-330Б, який може здійснити вісім відключень струмів короткого замикання, така величина становить $1/8 = 0,125$. Ці величини взято як середні значення функцій належності нечітких термів "вичерпаний".

3. Поняття "вимикач з вичерпаним ресурсом, допустимим для подальшої роботи" застосовується для всіх вимикачів, що знаходяться між першими двома станами. Як середнє значення функції належності нечіткого терму "допустимий" взято 0,36, оскільки згідно з [7] вимикач з таким значенням залишкового ресурсу може досить надійно відключити струм короткого замикання потужності, що вказана в паспортних даних.

У результаті, для попередньої настройки нечітких термів лінгвістичних змінних "механічний ресурс" і "комутаційний ресурс" взято такі середні значення функцій належності: механічний ресурс: $a_{\text{поч}} = 1$, $a_{\text{доп}} = 0,36$, $a_{\text{вич}} = 0,01$; комутаційний ресурс: $a_{\text{поч}} = 0,832$, $a_{\text{доп}} = 0,405$, $a_{\text{вич}} = 0,148$.

Для визначення лівих та правих границь функцій належності застосовано розбиття Руспіні [4], яке забезпечує прозорість нечіткої моделі.

Наведемо аналітичні вирази функцій належності $\mu_{\Pi_1}(R_{\text{мех}})$, $\mu_{Д_1}(R_{\text{мех}})$, $\mu_{В_1}(R_{\text{мех}})$ механічного $R_{\text{мех}}$ ресурсу та $\mu_{\Pi_2}(R_{\text{ком}})$, $\mu_{Д_2}(R_{\text{ком}})$, $\mu_{В_2}(R_{\text{ком}})$ комутаційного $R_{\text{ком}}$ ресурсу:

1) "механічний ресурс":
"початковий"

$$\mu_{\Pi_1}(R_{\text{мех}}) = \begin{cases} 1 - \frac{1 - R_{\text{мех}}}{0,64}, & 0,36 \leq R_{\text{мех}} \leq 1, \\ 0, & R_{\text{мех}} < 0,36; \end{cases}$$

"допустимий"

$$\mu_{Д_1}(R_{\text{мех}}) = \begin{cases} 1 - \frac{0,36 - R_{\text{мех}}}{0,35}, & 0,01 \leq R_{\text{мех}} \leq 0,36, \\ 1 - \frac{R_{\text{мех}} - 0,36}{0,64}, & 0,36 \leq R_{\text{мех}} \leq 1, \\ 0, & R_{\text{мех}} < 0,01; \end{cases}$$

"вичерпаний"

$$\mu_{В_1}(R_{\text{мех}}) = \begin{cases} 1 - \frac{R_{\text{мех}} - 0,01}{0,35}, & 0,01 \leq R_{\text{мех}} \leq 0,36, \\ 0, & R_{\text{мех}} \leq 0,36, \\ 1, & R_{\text{мех}} < 0,01; \end{cases}$$

2) "комутаційний ресурс":

"початковий"

$$\mu_{\Pi_2}(R_{\text{ком}}) = \begin{cases} 1 - \frac{1 - R_{\text{ком}}}{0,64}, & 0,36 \leq R_{\text{ком}} \leq 1, \\ 0, & R_{\text{ком}} < 0,36; \end{cases}$$

"допустимий"

$$\mu_{Д_2}(R_{\text{ком}}) = \begin{cases} 1 - \frac{0,36 - R_{\text{ком}}}{0,35}, & 0,01 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,36, \\ 1 - \frac{R_{\text{ком}} - 0,36}{0,64}, & 0,36 \leq R_{\text{ком}} \leq 1, \\ 0, & R_{\text{ком}} < 0,125; \end{cases}$$

"вичерпаний"

$$\mu_{В_2}(R_{\text{ком}}) = \begin{cases} 1 - \frac{R_{\text{ком}} - 0,01}{0,35}, & 0,01 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,36, \\ 0, & R_{\text{ком}} \geq 0,36, \\ 1, & R_{\text{ком}} < 0,125. \end{cases}$$

Графічні зображення початкових функцій належності $\mu(R_{\text{мех}})$ і $\mu(R_{\text{ком}})$ наведено на рис. 1, 2. Середні значення початкових функцій належності нечітких термів трикутної форми вихідної лінгвістичної змінної становлять: $a_B = 1$, $a_{CB} = 0,75$, $a_C = 0,5$, $a_{CH} = 0,25$, $a_H = 0$.

На основі введених нечітких термів, досвіду експлуатації та нормативних документів сформовано базу знань нечіткої моделі вимикача, яка складається з правил нечіткого висновку, наведених у табл. 1.

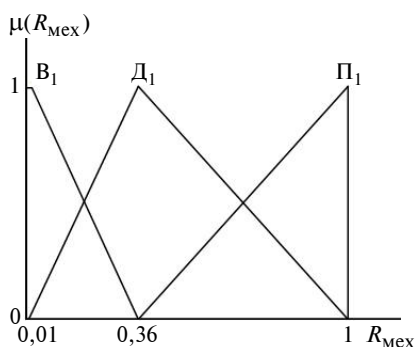


Рис. 1. Початкові функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної “механічний ресурс”

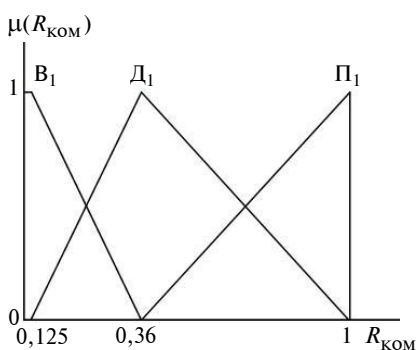


Рис. 2. Початкові функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної “комутаційний ресурс”

Таблиця 1. База правил прийняття рішення

$R_{\text{ком}} \backslash R_{\text{мех}}$	B_2	D_2	P_2
B_1	В	СВ	СВ
D_1	СВ	С	СН
P_1	СВ	СН	Н

Дефазифікація вихідної нечіткої змінної здійснюється згідно з алгоритмом Мамдані.

Для настройки параметрів функцій належності використовувались дані експлуатації лінійних вимикачів ВВ-330Б, які встановлені на п'яти підстанціях однієї з енергосистем України. Середній термін експлуатації вимикачів становить 35 років, найменший – 20 років, найбільший – 43 роки. Формування навчальної вибірки здійснюється таким чином.

Оскільки немає статистичних даних щодо кількості відключених вимикачами коротких замикань, то для оцінки випрацювання комутаційного ресурсу застосовано методику [2],

яка використовує узагальнені статистичні дані щодо питомої кількості коротких замикань на 100 км ліній електропередач. Для визначення допустимої кількості відключених коротких замикань та оцінки залишкового ресурсу застосовано методику прогнозування допустимої кількості відключень при відсутності фактичних значень струмів короткого замикання [1]. Для визначення кількості циклів включення-відключення вимикачів взято статистичні дані щодо середньої кількості циклів вимикачів за рік, значення допустимої кількості циклів включення-відключення взято з [8], а оцінка статистичної ймовірності безвідмовної роботи вимикачів здійснювалась відповідно до [3, 9]. Отримані результати зведені в табл. 2.

Функції належності нечітких термів “механічний ресурс” та “комутаційний ресурс” після настройки за допомогою нейронних мереж за статистичними даними 12-ти навчальних вибірок механічного та комутаційного ресурсів вимикачів серії ВВ-330Б мають такі середні значення: механічний ресурс – $a_{\text{поч}} = 0,812$, $a_{\text{доп}} = 0,387$, $a_{\text{вич}} = 0,011$; комутаційний ресурс – $a_{\text{поч}} = 0,832$, $a_{\text{доп}} = 0,405$, $a_{\text{вич}} = 0,148$.

Нижче для порівняння наведені аналітичні вирази функцій належності для комутаційного ресурсу та графічні зображення після настройки за допомогою нейронечіткої мережі функцій належності нечітких термів лінгвістичних змінних “механічний ресурс” (рис. 3) і “комутаційний ресурс” (рис. 4).

Таблиця 2. Значення залишкових ресурсів та ймовірностей відмови вимикачів серії ВВ-330Б

Вимикач	N_0	$N_{\text{факт}}$	$R_{\text{ком}}$	M_0	$M_{\text{факт}}$	$R_{\text{мех}}$	q (ймовірність відмови)
Л251/1	17	13	0,235	1000	800	0,2	0,798
Л251/2	17	16	0,059	1000	800	0,2	0,798
Л219/1	16	13	0,188	1000	760	0,24	0,781
Л219/2	16	6	0,625	1000	860	0,14	0,821
Л246/1	14	4	0,714	1000	800	0,2	0,798
Л246/2	14	4	0,714	1000	800	0,2	0,798
Л236/1	20	6	0,7	1000	620	0,38	0,711
Л236/2	20	6	0,7	1000	620	0,38	0,711
Л207	12	2	0,833	1000	400	0,6	0,551
Л208	12	5	0,583	1000	480	0,52	0,617
Л253/1	24	15	0,375	1000	740	0,26	0,772
Л253/2	24	18	0,25	1000	720	0,28	0,763

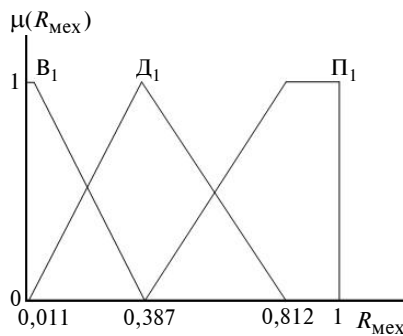


Рис. 3. Функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної “механічний ресурс”, настроєні за допомогою нейронної мережі

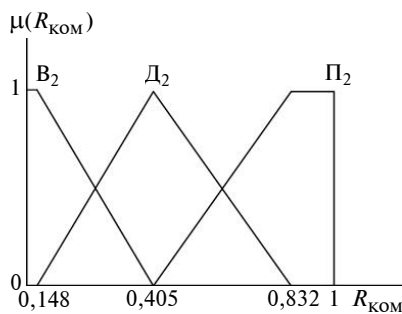


Рис. 4. Функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної “комутаційний ресурс”, настроєні за допомогою нейронної мережі

Функції належності для “комутаційного ресурсу”:

“початковий”

$$\mu_{\Pi_2}(R_{\text{ком}}) = \begin{cases} 1 - \frac{0,832 - R_{\text{ком}}}{0,427}, & 0,405 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,832, \\ 0, & R_{\text{ком}} \leq 0,405, \\ 1, & R_{\text{ком}} > 0,832; \end{cases}$$

“допустимий”

$$\mu_{D_2}(R_{\text{ком}}) =$$

$$= \begin{cases} 1 - \frac{0,405 - R_{\text{ком}}}{0,427}, & 0,148 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,405, \\ 1 - \frac{R_{\text{ком}} - 0,405}{0,427}, & 0,405 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,832, \\ 0, & R_{\text{ком}} < 0,148, R_{\text{ком}} > 0,832; \end{cases}$$

“вичерпаний”

$$\mu_{B_2}(R_{\text{ком}}) =$$

$$= \begin{cases} 1 - \frac{R_{\text{ком}} - 0,148}{0,257}, & 0,148 \leq R_{\text{ком}} \leq 0,405, \\ 0, & R_{\text{ком}} > 0,405, \\ 1, & R_{\text{ком}} < 0,148. \end{cases}$$

Приклад. Для підтвердження адекватності нечіткої моделі визначимо ймовірність відмови для вимикача типу ВВ-330Б-31,5/2000-У1, який реально відмовив у процесі експлуатації. Значення його залишкового механічного та комутаційного ресурсів такі: $R_{\text{мех}} = 0,34$, $R_{\text{ком}} = 0,125$. Згідно з отриманими функціями належності, ступені належності становлять:

$$\mu_{\Pi_1}(R_{\text{мех}}) = 0, \quad \mu_{D_1}(R_{\text{мех}}) = 1 - \frac{0,387 - 0,34}{0,374} = 0,875,$$

$$\mu_{B_1}(R_{\text{мех}}) = 1 - \frac{0,34 - 0,011}{0,376} = 0,125,$$

$$\mu_{\Pi_2}(R_{\text{ком}}) = 0, \quad \mu_{D_2}(R_{\text{ком}}) = 0, \quad \mu_{B_2}(R_{\text{ком}}) = 1.$$

Згідно з базою правил прийняття рішення (див. табл. 1) ставимо у відповідність вхідним нечітким термам вихідні з відповідними ступенями належності (рис. 5) та, згідно з логічною операцією мінімуму, визначаємо трапеції, що відсікаються ними, від відповідних функцій належності вихідної величини “ймовірність відмови вимикача”.

Після виконання процедури агрегування отриманих трапецій за методом середніх центрів Мамдані визначаємо ймовірність відмови вимикача ВВ-330Б-31, 512000-У1:

$$q = \frac{\int_{0,5}^1 q\mu(q)dq}{\int_{0,5}^1 \mu(q)dq} = 0,752,$$

де $q, \mu(q)$ – значення ймовірностей відмови і функції належності, що відповідають нечітким термам вихідної лінгвістичної змінної “ймовірність відмови вимикача”.

Отриманий результат свідчить про дуже високу ймовірність відмови вимикача. В реальних умовах експлуатація вимикача на ПС 330 кВ “Трихати” Південної ЕС з такими значеннями залишкового комутаційного та механічного ресурсів призвела до технологічного

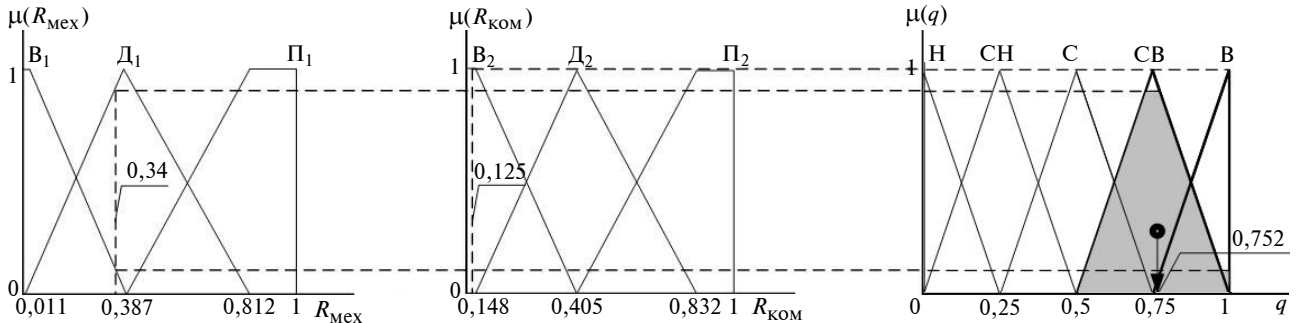


Рис. 5. Оцінка ймовірності відмови високовольтного вимикача типу ВВ-330Б-31,5/2000-У1

порушення. Технологічне порушення відбулося незважаючи на те, що з моменту останнього капітального ремонту вимикача пройшло всього близько півтора року (при періодичності капітальних ремонтів шість років). Серед причин, які викликали це технологічне порушення, слід відзначити тривалий термін експлуатації вимикача, близький до гранично допустимого (на момент відмови 22 роки при допустимому періоді експлуатації 25 років) та велику кількість відключень струмів короткого замикання після останнього капітального ремонту.

Отриманий на прикладі реальної відмови вимикача результат, а також тестування моделі при інших вибірках свідчить про адекватність запропонованої нечіткої моделі визначення ймовірності відмови високовольтного вимикача та можливість її застосування в реальних умовах експлуатації за наявності неповноти та нечіткості експлуатаційних даних з відключень струмів короткого замикання і циклів включення-відключення.

Висновки

В умовах об'єктивно існуючої неповноти і нечіткості щодо параметрів коротких замикань комплексна оцінка та прогнозування технічного

стану, визначення ймовірності відмови високовольтних вимикачів з достатньою для практики точністю можуть бути виконані на основі нечітких моделей за умови настройки функцій належності лінгвістичних змінних.

Проведена настройка функції належності та тестування нечітких моделей оцінки технічного стану високовольтних вимикачів різних типів, зокрема повітряних, підтверджує адекватність запропонованої нечіткої моделі визначення ймовірності відмови вимикачів.

Враховуючи труднощі в одержанні і відсутність достатнього об'єму експериментальних статистичних вибірок, які зв'язують вхідні змінні та вихідну змінну стану вимикачів, доцільно створювати бази функцій належності нечітких моделей однотипного обладнання з накопиченням реальних статистичних вибірок, чому будуть сприяти створювані системи моніторингу технічного стану обладнання.

Перспективним розвитком питань, які розглянуто в матеріалах статті, є розробка й ідентифікація параметрів нечітких моделей оцінки технічного стану і визначення ймовірності відмови силового й іншого комутаційного електрообладнання для розв'язання задач оцінки експлуатаційного ризику складних ЕЕС та систем електропостачання власних потреб теплових і атомних електростанцій.

Е.И. Бардик, Н.В. Костерев, В.В. Литвинов

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Для комплексной оценки технического состояния, определения вероятности отказа высоковольтных выключателей разных типов разработана математическая модель, основывающаяся на использовании теории нечетких множеств. С использованием реальных выборок параметров технического состояния высоковольтных воздушных выключателей выполнена параметрическая идентификация нечеткой модели. Доказаны адекватность предложенных нечетких моделей оценки технического состояния выключателей и целесообразность их использования в соответствующих экспертных системах оценивания риска снижения надежности электроснабжения потребителей.

Ye.I. Bardyk, M.V. Kosterev, V.V. Lytvynov

FUZZY MODELING OF A TECHNICAL CONDITION OF HIGH-VOLTAGE SWITCHES

Based on the theory of fuzzy sets, we elaborate the mathematical model for an integrated estimating of the technical condition as well as for determining the failure probability of various types of high-voltage switches. We also parametrically identify the fuzzy model by utilizing real selections of the technical condition parameters of high-voltage air switches. Finally, we demonstrate that these fuzzy estimation models of switches' technical condition can be applied in the expert estimating systems of risk decrease of consumer power supply reliability.

1. *Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации.* – М.: ОРГРЭС. – 1992. – 19 с.
2. *Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А.* Методика оценки коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации // Пром. энергетика. – 1995. – № 1. – С. 28–35.
3. *Андреев Д.А., Назарычев И.А.* Анализ методов расчета коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вест. ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 69–84.
4. *Штовба С.Д.* Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – www.matlab.exponenta.ru
5. *Ротштейн А.П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: Универсум, 1999. – 320 с.
6. *Костерев М.В., Бардик Е.И.* Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 132 с.
7. *Егонский А.А.* Системы диагностики, релейной защиты и автоматики в электроэнергетике. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – 152 с.
8. *Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А.* Механическая и коммутационная износостойкость выключателей // Пром. энергетика. – 1992. – № 8. – С. 14–16.
9. *РД 34.20.574.* Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками, 1985.

Рекомендована Радою
електроенерготехнічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
3 грудня 2010 року