

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Y.BARDIK, M.KOSTEREV, V.LITVINOV

SELF-REACTANCE AUTHENTICATION OF UNCLEAR MODELS OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF GRIDS

Анотація. Оцінка і прогнозування технічного стану електрообладнання є однією з найбільш важливих задач експлуатації енергосистем, від правильного вирішення якої залежать надійність електропостачання споживачів.

Ключові слова: оцінка технічного стану, прогнозування, нечіткі моделі.

Аннотация. Оценка и прогнозирование технического состояния электрооборудования является одной из наиболее важных задач эксплуатации энергосистем, от правильного решения которой зависят надежность электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: оценка технического состояния, прогнозування, нечеткие модели.

Annotation. An estimation and prognostication of the technical state of electrical equipment is one of the most essential tasks of exploitation of grids, from the correct decision of which depend reliability of электроснабжения of users.

Key words: estimation of the technical state, прогнозування, unclear models.

Вступ

Оцінка і прогнозування технічного стану електрообладнання є однією з найбільш важливих задач експлуатації енергосистем, від правильного вирішення якої залежать надійність електропостачання споживачів. Ці задачі відносяться до категорії задач, які погано формалізуються та є слабко структурованими внаслідок таких факторів:

- наявність різномірної вхідної інформації (кількісні і якісні значення змінних), неповнота вхідної інформації, різночасність вимірювань параметрів об'єкта;
- невизначеність, яка зумовлена неможливістю адекватного математичного опису процесів внаслідок вимірювань змінних стану;
- недостатність ретроспективних даних про експлуатацію електрообладнання та ін.

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

Достовірність рішень, які одержують на основі нечітких моделей електрообладнання, в значній мірі залежить від точності представлення функцій належності вхідних даних і вихідних лінгвістичних змінних.

В зв'язку з цим важливо визначити параметри функцій належності нечіткої моделі електрообладнання, використовуючи наявні експериментальні статистичні дані (вибірки для навчання), які зв'язують вхідні і вихідні нечіткі змінні.

Реально на практиці дуже рідко вдається одержати експериментальні статистичні дані щодо функціонування обладнання, тому актуальною задачею є створення бази даних функцій належності нечітких моделей однотипного електрообладнання, які можна використати для

конкретної одиниці обладнання, якщо для нього відсутні дані статистичних вибірок.

Постановка задачі

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

Нечітка модель об'єкта F має таку структуру [1,2]:

- функції належності вхідних і вихідних змінних $\mu(p)$;
- база нечітких правил «ЯКЩО..., ТО...» з ваговими коефіцієнтами w ;
- механізм нечіткого виводу, який використовує правила «ЯКЩО..., ТО...» для відображення вхідних нечітких множин у нечітку вихідну множину M ;
- метод дефазифікації D .

Тоді вихідна нечітка множина S визначається з виразу:

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

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 .

Виведемо 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.

Для заданої бази нечітких правил, механізму нечіткого виводу і 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 одержані експериментальні дані або розрахунково-модельні статистичні вибірки, які зв'язують вектор вхідних змінних X' і вихідну змінну Y' . Тоді задача параметричної ідентифікації нечіткої моделі полягає в наступному [1–3]: знайти такий вектор (P, w) , який забезпечує мінімальне значення середньоквадратичної нев'язки:

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

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

Нечітка модель високовольтного вимикача

Працездатність вимикача в основному визначається двома характеристиками – комутаційним ресурсом $R_{ком}$ і механічним ресурсом $R_{мех}$.

У відповідності з [4,5], залишковий комутаційний ресурс вимикача після відключення n струмів короткого замикання визначається наступним чином:

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

де $N_i = N_0 \cdot \frac{I_{max}}{I_{кз,i}}$; N_0 , I_{max} – допустима кількість відключень струмів короткого замикання і

допустиме значення струму короткого замикання, які задають в паспортних даних вимикача;

$I_{кз,i}$ – фактичне значення струму i -го короткого замикання, який вимикає вимикач.

Залишковий механічний ресурс [6]:

$$R_{мех} = \frac{M_0 - M}{M_0},$$

де M_0 – допустиме число циклів «включення-відключення»;

M – фактичне число виконаних вимикачем циклів «включення-відключення».

Як вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі вимикача приймемо такі:

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

Введемо множини значень лінгвістичних змінних (терм – множини): $A_{11} = \Pi_1 = < \text{початковий} >$, $A_{12} = D_1 = < \text{допустимий} >$, $A_{13} = B_1 = < \text{вичерпаний} >$, $A_{21} = \Pi_2 = < \text{початковий} >$, $A_{22} = D_2 = < \text{допустимий} >$, $A_{23} = B_2 = < \text{вичерпаний} >$.

Як вихідну лінгвістичну змінну приймаємо $S = < \text{суб'єктивна імовірність відмови вимикача} >$, яка задана на універсальній множині $Y = [0, 1]$ зі значеннями: $S_1 = B = < \text{висока імовірність відмови} >$, $S_2 = CB = < \text{середньо-висока імовірність відмови} >$, $S_3 = C = < \text{середня імовірність відмови} >$, $S_4 = CH = < \text{середньо-низька імовірність відмови} >$, $S_5 = H = < \text{низька імовірність відмови} >$.

Початкові функції належності нечітких термів вхідних змінних «Механічний ресурс» та «Комутаційний ресурс» будуються, виходячи з наступних даних.

Поняття «вимикач з початковим ресурсом» використовують до введених в експлуатацію нових вимикачів або до вимикачів після капітального 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» прийнято значення ресурсу, яке дорівнює 1.

Поняття «вимикач з відпрацьованим 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 [4], це така величина, за якої при наступному відключенні струму короткого замикання відпрацювання ресурсу може досягти 1. Для вимикача типу ВВ-330Б, який може здійснити 8 відключень струмів КЗ, така величина дорівнює $1/8=0,125$. Ці величини прийнято як середні значення функцій належності нечітких термів «вичерпаний».

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» прийнято 0,36 – оскільки, згідно з [7], вимикач з таким значенням залишкового ресурсу може досить надійно відключити струм короткого замикання потужності, що вказана у паспортних даних.

В результаті, для попередньої настройки нечітких термів лінгвістичних змінних «Механічний ресурс» та «Комутаційний ресурс» прийнято наступні середні значення функцій належності:

- механічний ресурс: $a_{\text{поч}} = 1; a_{\text{дон}} = 0,36; a_{\text{вич}} = 0,01;$
- комутаційний ресурс: $a_{\text{поч}} = 1; a_{\text{дон}} = 0,36; a_{\text{вич}} = 0,125.$

Для визначення лівих та правих границь функцій належності (рис.1 та 2) застосовано розбиття Руспіні [2], яке забезпечує прозорість нечіткої моделі. Нижче наведено аналітичні вирази початкових функцій належності механічного і комутаційного ресурсів та їх графічні зображення.

1) «Механічний ресурс»:

- «початковий»

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

- «допустимий»

$$\mu_{D_1}(R_M) = \begin{cases} 1 - \frac{0,36 - R_M}{0,35}, & 0,01 \leq R_M \leq 0,36; \\ 1 - \frac{R_M - 0,36}{0,64}, & 0,36 \leq R_M \leq 1; \\ 0, & R_M < 0,01. \end{cases}$$

2) «Комутаційний ресурс»:

- «початковий»

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

- «допустимий»

$$\mu_{D_2}(R_K) = \begin{cases} 1 - \frac{0,36 - R_K}{0,235}; & 0,125 \leq R_K \leq 0,36; \\ 1 - \frac{R_K - 0,36}{0,64}; & 0,36 \leq R_K \leq 1; \\ 0; & R_K < 0,125. \end{cases}$$

• «вичерпаний»

$$\mu_{B_1}(R_M) = \begin{cases} 1 - \frac{R_M - 0,01}{0,35}, & 0,01 \leq R_M \leq 0,36; \\ 0, & R_M \leq 0,01; \\ 1, & R_M > 0,36. \end{cases}$$

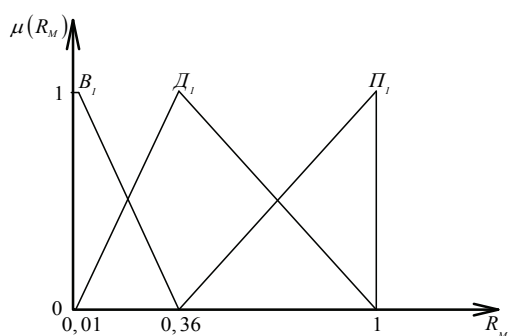


Рис. 1. Початкові функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної «Механічний ресурс»

• «вичерпаний»

$$\mu_{B_2}(R_K) = \begin{cases} 1 - \frac{R_K - 0,125}{0,235}, & 0,125 \leq R_K \leq 0,36; \\ 0, & R_K > 0,36; \\ 1, & R_K < 0,125. \end{cases}$$

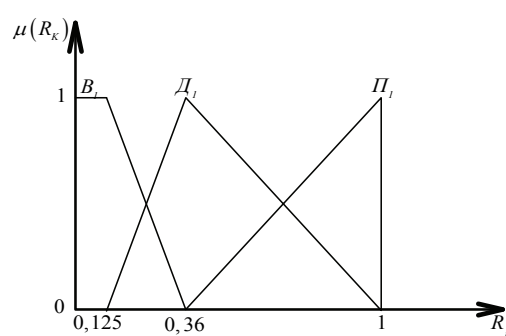


Рис. 2. Початкові функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної «Комутаційний ресурс»

Початкові функції належності вихідної лінгвістичної змінної прийняті в трикутній формі із середніми значеннями нечітких термів, які дорівнюють:

$$a_B = 1; a_{CB} = 0,75; a_C = 0,5; a_{CH} = 0,25; a_H = 0.$$

На основі прийнятих нечітких термів, досвіду експлуатації та нормативних документів сформовано базу правил нечіткої моделі вимикача, яка складається із наступних правил нечіткого виводу (табл. 1):

Таблиця 1

База правил нечіткої моделі вимикача

$R_{\text{мех}}$ \ $R_{\text{ком}}$	B_2	D_2	P_2
B_1	B	CB	CB
D_1	CB	C	CH
P_1	CB	CH	H

Для дефазифікації вихідної нечіткої змінної $S = < \text{суб'єктивна імовірність відмови вимикача} >$ застосовано алгоритм нечіткого логічного виводу Мамдані.

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

Оскільки відсутні статистичні дані щодо кількості відключених вимикачами коротких замикань, для оцінки відпрацювання комутаційного ресурсу застосовано методику [5], яка використовує узагальнені статистичні дані щодо питомої кількості коротких замикань на 100 км ЛЕП. Для визначення допустимої кількості відключених коротких замикань та оцінки залишкового ресурсу застосовано методику прогнозування допустимої кількості відключень при відсутності фактичних значень струмів короткого замикання [4]. Для визначення кількості циклів «включення-відключення» вимикачів прийнято статистичні дані щодо середньої кількості циклів вимикачів за рік, значення допустимої кількості циклів «включення-відключення» прийнято згідно з [6], а оцінка статистичної імовірності безвідмовної роботи вимикачів здійснювалась у відповідності з [9, 10]. Отримані результати зведені в табл. 2.

Виходячи із сформованої навчальної вибірки, для настройки параметрів функцій належності

доцільно використати нейронні мережі, які здатні навчатися шляхом аналізу позитивних та негативних прикладів.

Синтез нейронних мереж здійснюється наступним чином. За сформованими вибірками будуються вхідні вектори нейронної мережі механічного $\bar{R}_M = (R_{M1}, R_{M2} \dots R_{Mn})$ та нейронної мережі комутаційного $\bar{R}_K = (R_{K1}, R_{K2} \dots R_{Kn})$ ресурсів. Вихідний вектор кожної нейронної мережі складається з одного елемента – параметра, який характеризує функцію належності нечіткого терма відповідної лінгвістичної змінної. Оскільки вхідні змінні безпосередньо не пов'язані з вихідними, доцільно застосувати нейронну мережу, яка містить один прихований шар нейронів. Як функцію активації прийнято логістичну функцію [8]. Навчання нейронних мереж механічного та комутаційного ресурсів вимикача здійснено роздільно згідно з алгоритмом зворотного розповсюдження [8] за даними сформованих навчальних вибірок (табл.2).

Таблиця 2

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

№ п/п	Вимикач	N ₀	N _{факт}	R _{ком}	M ₀	M _{факт}	R _{мех}	q (імовірність відмови)
1	Л251/1	17	13	0,235	1000	800	0,2	0,798
2	Л251/2	17	16	0,059	1000	800	0,2	0,798
3	Л219/1	16	13	0,188	1000	760	0,24	0,781
4	Л219/2	16	6	0,625	1000	860	0,14	0,821
5	Л246/1	14	4	0,714	1000	800	0,2	0,798
6	Л246/2	14	4	0,714	1000	800	0,2	0,798
7	Л236/1	20	6	0,7	1000	620	0,38	0,711
8	Л236/2	20	6	0,7	1000	620	0,38	0,711
9	Л207	12	2	0,833	1000	400	0,6	0,551
10	Л208	12	5	0,583	1000	480	0,52	0,617
11	Л253/1	24	15	0,375	1000	740	0,26	0,772
12	Л253/2	24	18	0,25	1000	720	0,28	0,763

Параметри функцій належності нечітких термів «Механічний ресурс» та «Комутаційний ресурс» визначаються наступним чином: на вхід нейронної мережі подається вектор \bar{R}_M , сформований за початковими середніми значеннями функцій належності відповідних термів. Отримана на виході нейронної мережі величина приймається як середнє значення функції належності відповідного нечіткого терма.

Після настройки за статистичними даними 12 навчальних вибірок механічного та комутаційного ресурсів вимикачів серії ВВ-330Б отримано наступні середні значення функцій належності:

- механічний ресурс: $a_{поч} = 0,812$; $a_{дон} = 0,387$; $a_{вич} = 0,011$;
- комутаційний ресурс: $a_{поч} = 0,832$; $a_{дон} = 0,405$; $a_{вич} = 0,148$.

Нижче наведено аналітичні вирази функцій належності механічного і комутаційного ресурсів та їхні графічні зображення (рис.3 та 4) після настройки за допомогою нейро-нечіткої моделі.

<p>1) «Механічний ресурс»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • «початковий» $\mu_{\pi_1}(R_M) = \begin{cases} 1 - \frac{0,812 - R_M}{0,425}, & 0,387 \leq R_M \leq 0,812; \\ 0, & R_M \leq 0,387; \\ 1, & R_M > 0,812. \end{cases}$	<p>2) «Комутаційний ресурс»:</p> <ul style="list-style-type: none"> • «початковий» $\mu_{\pi_2}(R_K) = \begin{cases} 1 - \frac{0,832 - R_K}{0,427}, & 0,405 \leq R_K \leq 0,832; \\ 0, & R_K \leq 0,405; \\ 1, & R_K < 0,832. \end{cases}$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

- «допустимий»

$$\mu_{\bar{A}_1}(R_M) = \begin{cases} 1 - \frac{0,387 - R_M}{0,376}, & 0,011 \leq R_M \leq 0,387; \\ 1 - \frac{R_M - 0,387}{0,425}, & 0,387 \leq R_M \leq 0,812; \\ 0, & R_M < 0,011, R_M > 0,812. \end{cases}$$

- «допустимий»

$$\mu_{\bar{A}_2}(R_K) = \begin{cases} 1 - \frac{0,405 - R_K}{0,257}, & 0,148 \leq R_K \leq 0,405; \\ 1 - \frac{R_K - 0,405}{0,427}, & 0,405 \leq R_K \leq 0,832; \\ 0; & R_K < 0,148, R_K > 0,832. \end{cases}$$

- «вичерпаний»

$$\mu_{B_1}(R_M) = \begin{cases} 1 - \frac{R_M - 0,011}{0,376}, & 0,011 \leq R_M \leq 0,387; \\ 0, & R_M > 0,387; \\ 1, & R_M < 0,011. \end{cases}$$

- «вичерпаний»

$$\mu_{B_2}(R_K) = \begin{cases} 1 - \frac{R_K - 0,148}{0,257}, & 0,148 \leq R_K \leq 0,405; \\ 0, & R_K > 0,405; \\ 1, & R_K < 0,148. \end{cases}$$

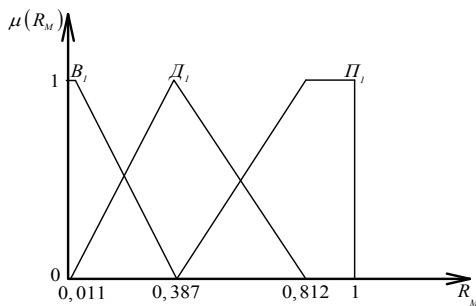


Рис. 3. Функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної «Механічний ресурс», настроєні за допомогою нейронної мережі

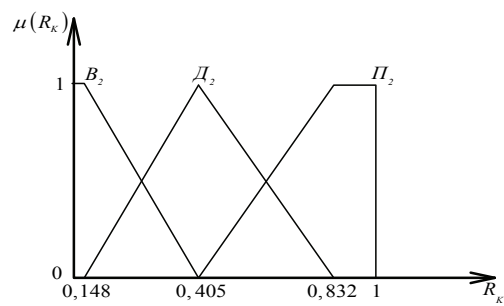


Рис. 4. Функції належності нечітких термів лінгвістичної змінної «Комутаційний ресурс», настроєні за допомогою нейронної мережі

Приклад. Визначимо за допомогою нечіткої моделі імовірність відмови для вимикача типу ВВ-330Б-31,5/2000-У1, який відмовив в процесі експлуатації. Значення його залишкового механічного та комутаційного ресурсів складають: $R_{мех} = 0,15$, $R_{ком} = 0,2$. Згідно з отриманими функціями належності ступені належності складають:

$$\mu_{P1}(R_M) = 0; \mu_{D1}(R_M) = 0,37; \mu_{B1}(R_M) = 0,63;$$

$$\mu_{P2}(R_K) = 0; \mu_{D2}(R_K) = 0,202; \mu_{B2}(R_K) = 0,798.$$

Згідно з базою правил прийняття рішення (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».

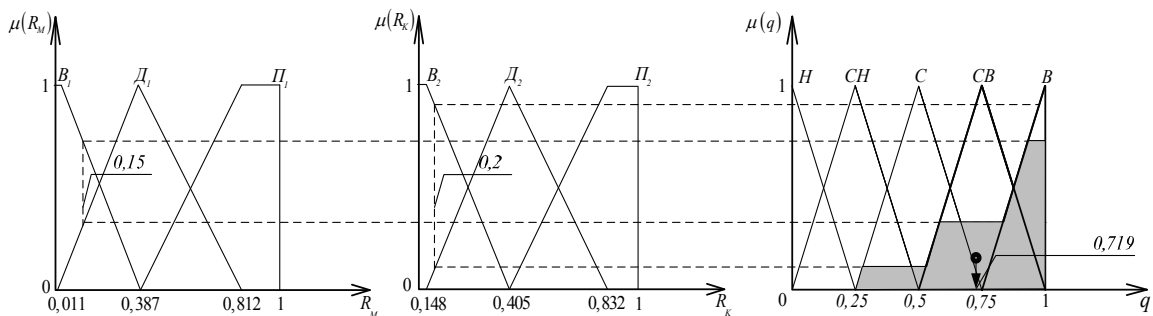


Рис. 5. Оцінка імовірності відмови високовольтного вимикача типу ВВ-330Б-31,5/2000-У1

Після виконання процедури агрегування отриманих трапецій за методом середніх центрів Мамдані визначасмо ймовірність відмови вимикача ВВ-330Б-31,5/2000-У1:

$$q = \frac{\int_{0,25}^1 q \cdot \mu(q) \cdot dq}{\int_{0,25}^1 \mu(q) \cdot dq} = 0,719.$$

Отриманий результат показує, що існує дуже висока ймовірність відмови вимикача. В реальних умовах експлуатація цього вимикача на ПС 330 кВ «Трихати» Південної ЕС з такими значеннями залишкового механічного і комутаційного ресурсу призвела до капітального ремонту. Технологічне порушення відбулося незважаючи на те, що від часу останнього капітального ремонту вимикача пройшло біля 1,5 років (при періодичності капітальних ремонтів 6 років). Серед причин, які викликали це технологічне порушення, слід відмітити тривалий термін експлуатації вимикача, близький до гранично допустимого (на момент відмови 22 роки при допустимому періоді експлуатації 25 років), велику кількість відключень струмів короткого замикання після останнього капітального ремонту та велику кількість циклів «включення-відключення». Отриманий на прикладі реальної відмови вимикача результат 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».

Нечітка модель асинхронного двигуна для визначення стану ізоляції обмоток

Статистичні дані відмов асинхронних двигунів (АД) показують, що 80...90% відмов спричиняються внаслідок пошкоджень ізоляції (виткової, корпусної і міжфазної) обмоток статора. На практиці широко застосовується метод діагностики ізоляції постійною напругою [11], за яким при випробуванні визначаються кількісні характеристики змінних, і на основі сформованих інтервальних критеріїв визначають стан ізоляції в якісних характеристиках.

Об'єктивно існуючі похибки вимірювальних приладів, різночасність вимірювання параметрів ізоляції електродвигунів, а також обмежені для багатьох типів електрообладнання статистичні дані по конкретних параметрах ізоляції, за результатами статистичної обробки яких визначаються критеріальні значення параметрів, призводить до того, що неможливо встановити жорсткі межі, які відділяють один стан ізоляції від іншого.

Крім того, як показує практика експлуатації, кількість сполучень (комбінацій) параметрів технічного стану ізоляції, які вимірюють в процесі експлуатації і які знаходяться поза існуючими вирішальними правилами «ЯКЩО..., ТО...» може бути значною, що не дає можливості, використовуючи традиційні методи діагностики, об'єктивно приймати рішення щодо технічного стану.

В цьому випадку для діагностування технічного стану ізоляції обмоток асинхронного двигуна доцільно використати апарат нечіткої логіки.

Як вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі асинхронного двигуна приймемо наступні:

- $A_1 = C_1 = \frac{U_{np}}{U_n} = < \text{пробивна напруга} >$, областю визначення якої є множина $\frac{U_{np}}{U_n} = [0,6], \text{ в.о.};$
- $A_2 = C_2 = \frac{R_{\phi 0}}{U_n} = < \text{опір ізоляції} >$, областю визначення якого є множина $\frac{R_{\phi 0}}{U_n} = [0,15], \frac{\text{кОм}}{\text{В}};$
- $A_3 = C_3 = t_z = < \text{час короткого замикання} >$, областю визначення якого є множина $t_z = [0,40], \text{ с};$
- $A_4 = C_4 = \frac{U_{0d \max}}{U_0} = < \text{максимальна напруга відновлення} >$, областю визначення якої є множина $\frac{U_{0d \max}}{U_0} = [0,2], \text{ в.о.};$
- $A_5 = C_5 = t_{0d} = < \text{час відновлення напруги} >$, областю визначення якого є множина $t_{0d} = [0,200], \text{ с};$

- $A_6 = C_6 = \frac{R_{60}}{R_{15}} = < \text{коефіцієнт абсорбції} >$, областю визначення якого є множина $\frac{R_{60}}{R_{15}} = [0,3]$, в.о.;
- $A_7 = C_7 = \frac{i_{в. max}}{i_{в. сеп}} = < \text{відношення максимального струму витоку до середнього} >$, областю визначення якого є множина $\frac{i_{в. max}}{i_{в. сеп}} = [0,6]$, в.о.

Кожна i - та вхідна лінгвістична змінна має наступні значення (нечіткі терми):

$$A_i = \{T_H^i, T_C^i, \dots, T_B^i, \tilde{T}^i\},$$

- де T_H^i – низьке значення параметра стану;
 T_C^i – середнє значення параметра стану;
 T_B^i – високе значення параметра стану;
 \tilde{T}^i – значення параметра стану „приблизно дорівнює”.

За вихідну лінгвістичну змінну прийемо $S = D = < \text{стан ізоляції обмотки} >$ з терм – множиною:

$$S = \{S_1, S_2, S_3\},$$

- де S_1 – < добрий стан ізоляції >;
 S_2 – < задовільний стан ізоляції >;
 S_3 – < незадовільний стан ізоляції >.

В табл.3, згідно з [11,12], наведений перелік критеріїв для оцінки технічного стану ізоляції АД з номінальною напругою 6 кВ при випробуваннях ізоляції постійним струмом.

Таблиця 3

Перелік критеріїв для оцінки технічного стану ізоляції АД з номінальною напругою 6кв при випробуваннях ізоляції постійним струмом

Параметр ізоляційної системи	Технічний стан ізоляції		
	Добрий	Задовільний	Незадовільний
Напруга пробую $\frac{U_{np}}{U_n}$, в.о.	> 3	> 2	≈ 1,5
Опір ізоляції $\frac{R_{60}}{U_n}$ при U_n	> 10	> 3	< 3
Час КЗ t_z , с	> 30	≈ 10	≈ 1
Максимальна напруга відновлення $\frac{U_{0d max}}{U_0}$, в.о.	> 0,1	> 0,05	≈ 0
Час відновлення напруги t_{0d} , с	> 120	≈ 30	≈ 0
Коефіцієнт абсорбції $\frac{R_{60}}{R_{15}}$, в.о.	> 2	≥ 1,5	≈ 1
Пульсація струму витоку $\frac{i_{в. max}}{i_{в. сеп}}$, в.о.	> 1...1,5	> 1...2	1...5

Відповідно до цих критеріїв визначені початкові функції належності вхідних лінгвістичних змінних, які показані на рис.6 – 12.

На основі визначених вхідних нечітких термів, а також критеріїв, наведених в табл.3 сформована база знань нечіткої моделі асинхронного двигуна із наступних правил «ЯКЩО..., ТО...» нечіткого виводу (табл. 4).

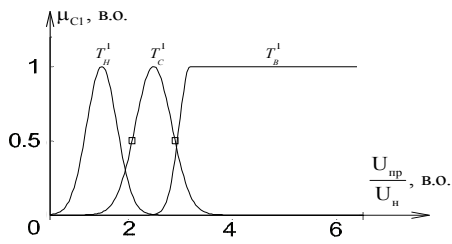


Рис. 6. Функції належності лінгвістичної змінної C_1

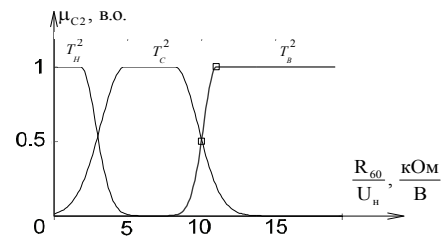


Рис. 7. Функції належності лінгвістичної змінної C_2

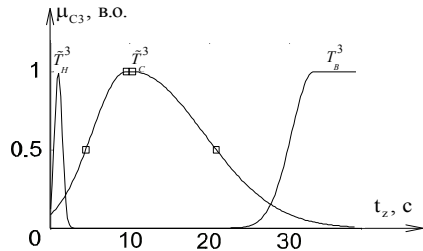


Рис. 8. Функції належності лінгвістичної змінної C_3

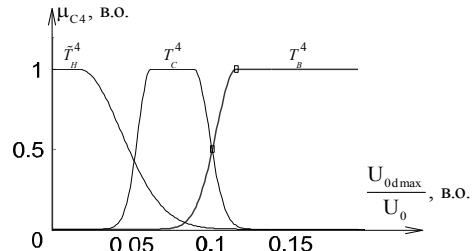


Рис. 9. Функції належності лінгвістичної змінної C_4

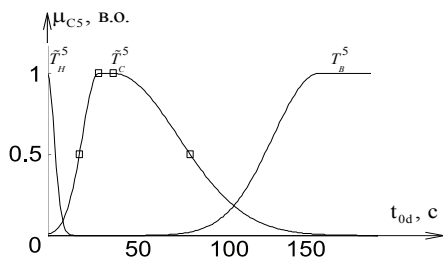


Рис. 10. Функції належності лінгвістичної змінної C_5

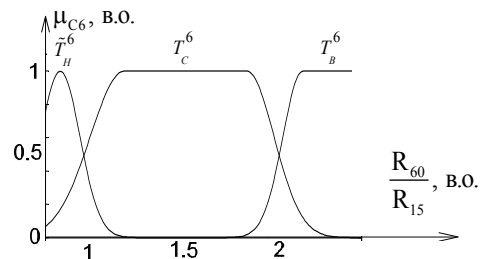


Рис. 11. Функції належності лінгвістичної змінної C_6

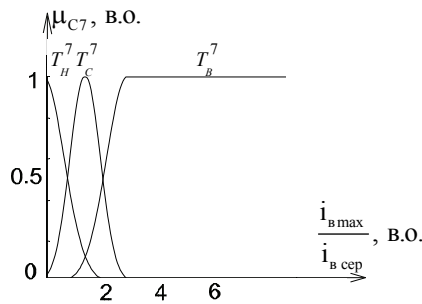


Рис. 12. Функції належності лінгвістичної змінної C_7

Таблиця 4

База знань нечіткої моделі асинхронного двигуна

$\frac{U_{нр}}{U_n}$	$\frac{R_{60}}{U_n}$	t_z	$\frac{U_{0d\ max}}{U_0}$	t_{0d}	$\frac{R_{60}}{R_{15}}$	$\frac{i_{в.\ max}}{i_{в.\ сep}}$	Терм – множини станів S
T_B^1	T_B^2	T_B^3	T_B^4	T_B^5	T_B^6	T_B^7	S_1
T_C^1	T_C^2	\tilde{T}_C^3	T_C^4	\tilde{T}_C^5	T_C^6	T_C^7	S_2
\tilde{T}_H^1	T_H^2	\tilde{T}_H^3	\tilde{T}_H^4	\tilde{T}_H^5	\tilde{T}_H^6	T_H^7	S_3

Правила нечіткої бази знань для оцінки технічного стану ізоляції АД мають вигляд:

$$\text{ЯКЩО } (c_1=T_B^1)I(c_2=T_B^2)I(c_3=T_B^3)I(c_4=T_B^4)I(c_5=T_B^5)I(c_6=T_B^6)I(c_7=T_B^7) \text{ ТО } (s=S_1);$$

$$\text{ЯКЩО } (c_1=T_C^1)I(c_2=T_C^2)I(c_3=T_C^3)I(c_4=T_C^4)I(c_5=T_C^5)I(c_6=T_C^6)I(c_7=T_C^7) \text{ ТО } (s=S_2);$$

$$\text{ЯКЩО } (c_1=T_H^1)I(c_2=T_H^2)I(c_3=T_H^3)I(c_4=T_H^4)I(c_5=T_H^5)I(c_6=T_H^6)I(c_7=T_H^7) \text{ ТО } (s=S_3).$$

Використовуючи функції належності, запишемо логічні правила у вигляді логічних рівнянь. При цьому логічну операцію „ \wedge ” заміняємо нечіткою логічною операцією „ \wedge ”:

$$\mu^{S_1} = \mu^B(c_1) \wedge \mu^B(c_2) \wedge \mu^B(c_3) \wedge \mu^B(c_4) \wedge \mu^B(c_5) \wedge \mu^B(c_6) \wedge \mu^B(c_7);$$

$$\mu^{S_2} = \mu^C(c_1) \wedge \mu^C(c_2) \wedge \mu^C(c_3) \wedge \mu^C(c_4) \wedge \mu^C(c_5) \wedge \mu^C(c_6) \wedge \mu^C(c_7);$$

$$\mu^{S_3} = \mu^H(c_1) \wedge \mu^H(c_2) \wedge \mu^H(c_3) \wedge \mu^H(c_4) \wedge \mu^H(c_5) \wedge \mu^H(c_6) \wedge \mu^H(c_7).$$

Розв'язку задачі діагностування технічного стану ізоляції АД постійним струмом відповідає той стан S_j^* , для якого функція належності має максимальне значення:

$$\mu^{S_j^*} = \max(\mu^{S_j^*}), j = \overline{1,3}.$$

Для визначення параметрів функцій належності вхідних нечітких змінних використовуються експериментальні дані параметрів технічного стану ізоляції статорної обмотки асинхронного двигуна, наведені в табл. 5.

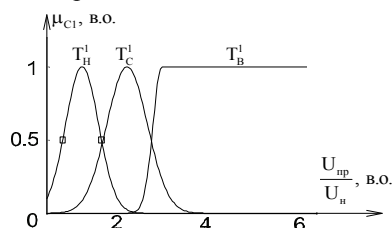
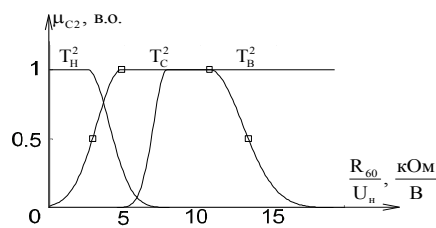
Рішення задачі параметричної ідентифікації нечіткої моделі АД було виконано за допомогою пакета Optimization Toolbox у системі MATLAB.

Таблиця 5

Експериментальні дані параметрів технічного стану ізоляції статорної обмотки АД

№ п/п	U_{np}/U_n	R_{60}/U_n	t_z	U_{0dmax}/U_0	t_{od}	R_{60}/R_{15}	$i_{vmax}/i_{в.сеп}$	Клас техн. стану
1	3,13	14,33	29,17	0,15	134,89	2,32	1,10	1
2	3,51	14,28	33,61	0,12	115,97	2,41	1,22	1
...
9	4,37	11,29	33,42	0,14	147,37	2,29	1,02	1
10	3,20	10,14	33,97	0,15	140,32	1,91	1,24	1
11	1,92	9,39	15,63	0,07	92,91	1,37	1,46	2
12	2,22	8,64	12,38	0,06	100,48	1,45	1,47	2
...
19	2,26	10,95	21,21	0,07	87,55	1,37	1,67	2
20	2,46	7,47	15,81	0,06	48,01	1,35	1,45	2
21	1,35	1,20	1,36	0,02	6,21	0,83	5,18	3
22	1,10	1,08	1,62	0,03	3,96	0,84	5,27	3
...
29	1,16	3,47	1,18	0,01	4,31	0,91	3,51	3
30	1,32	3,58	1,74	0,02	4,56	0,89	5,19	3

Функції належності лінгвістичних змінних параметрів стану ізоляції після настройки зображені на рис.13 – 19.

Рис. 13. Функції належності лінгвістичної змінної C_1 Рис. 14. Функції належності лінгвістичної змінної C_2

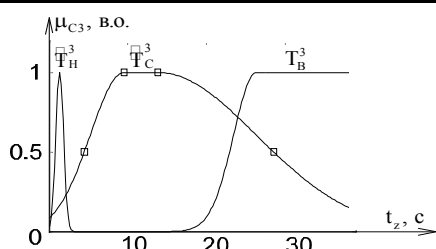


Рис. 15. Функції належності лінгвістичної змінної C_3

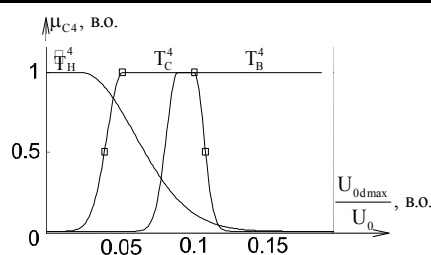


Рис. 16. Функції належності лінгвістичної змінної C_4

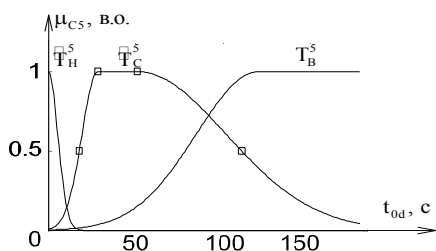


Рис. 17. Функції належності лінгвістичної змінної C_5

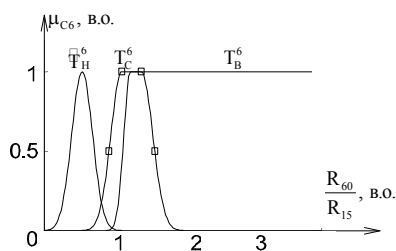


Рис. 18. Функції належності лінгвістичної змінної C_6

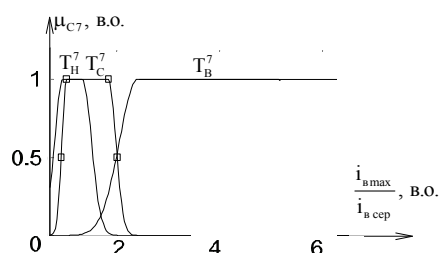


Рис. 19. Функції належності лінгвістичної змінної C_7

Висновки

1. Оцінка і прогнозування технічного стану електрообладнання з достатньою для практики достовірністю може бути виконана на основі нечітких моделей електрообладнання за умови настройки функцій належності лінгвістичних змінних.
2. Відсутність достатнього об'єму, а також об'єктивно існуючі труднощі в одержанні експериментальних статистичних вибірок, які зв'язують вхідні змінні і вихідні змінні стану обладнання потребує створення бази функцій належності нечітких моделей однотипного обладнання з накопиченням реальних статистичних вибірок, якому будуть сприяти створювані системи моніторингу технічного стану обладнання.
3. При аналізі технічного стану конкретного електрообладнання, для якого не сформовані функції належності нечітких моделей як першого наближення, можливо використовувати з бази даних відповідні функції належності електрообладнання аналогічного типу.
4. Розроблені нечіткі моделі силового і комутаційного обладнання енергосистем становлять основу бази знань прототипів експертних систем діагностування технічного стану електрообладнання і оцінки ризику експлуатації підсистем ЕЕС.

Література

1. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: Універсум. – 1999. – 320 с.
2. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. www.matlab.exponenta.ru.
3. Костерев М.В., Бардик Є.І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2010. – 131 с.
4. Методические указания по определению расхода коммутационного ресурса выключателей

- при эксплуатации. – М.: ОРГРЭС. – 1992. – 19 с.
5. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Методика оценки коммутационного ресурса выключателей при эксплуатации. – Промышленная энергетика. – 1995. – № 1. – С. 28–35.
 6. Неклепаев Б.Н., Востросаблин А.А. Механическая и коммутационная износостойкость выключателей. – Промышленная энергетика. – 1992. – № 8. – С. 14–16.
 7. Егонский А.А. Системы диагностики, релейной защиты и автоматики в электроэнергетике: учебное пособие. – Красноярск: ИПЦ КГТУ. – 2003. – 151 с.
 8. Круглов В.В., Дли М.И, Годунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Горячая линия – Телеком, 2003 – 222с.
 9. Андреев Д.А., Назарычев И.А. Анализ методов расчета коммутационного ресурса высоковольтных выключателей. – Вестник ИГЭУ. – 2008. – Выпуск 2. – С. 69–84.
 10. РД 34.20. 574. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. – 1985.
 11. Глинка Т.Я., Якубец М.С. Диагностика изоляции обмоток электрических машин постоянным током // Электротехника. – 2005. – № 7. – С. 20–24.
 12. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка. – 1983. – 200 с.
-
-