УДК 621.316

О.Є. РУБАНЕНКО, О.О. РУБАНЕНКО
Вінницький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ПРОГНОЗУВАННІ СТАНУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ

Досліджено пошкоджуваність високовольтних маслонаповнених вводів (ВВМВ) та проаналізовано основні причини виникнення дефектів. Вдосконалено математичну модель коефіцієнту залишкового ресурсу ВВМВ. Запропоновано представляти можливі сукупності контрольованих параметрів у вигляді нечітких множин. Розроблено структурну схему моделі коефіцієнта залишкового ресурсу високовольтного вводу.

Ключові слова: високовольтний маслонаповнений ввод, нечітке моделювання, пошкоджуваність, коефіцієнт залишкового ресурсу.

O.E. RUBANENKO, O.O. RUBANENKO
Vinnytsia national technical university

Using of fuzzy modeling in forecasting the high-voltage bushings

Abstract – investigated damage of high voltage oil-filled bushings (VVMV) and analyzes the main causes of defects. Improved mathematical model coefficient residual life VVMV. A represent possible combination of controlled parameters in the form of fuzzy sets. The block diagram of the model coefficient remaining life of high input.

Keywords: high-voltage oil-filled bushing, fuzzy modeling, damage, factor of the residual life.

Вступ. Швидко зростає частка устаткування, яке відпрацювало нормативний термін служби. У багатьох промислово розвинених країнах світу, у тому числі і в Україні, до 2010 р. велика частка такого устаткування перевищила розрахунковий термін експлуатації, це стосується і високовольтних вводів [1].

Це визначає необхідність продовження терміну роботоздатності обладнання, підвищення економічності і підтримки надійності роботи енергосистеми в цілому. Концепція продовження терміну служби високовольтних вводів, організації своєчасного ремонту і відновлення характеристик – одне з актуальних завдань в області експлуатації високовольтного електроустаткування в наш час. Проведення оперативного діагностування високовольтних вводів за відсутності результатів періодичних випробовувань на момент визначення поточного стану високовольтного вводу (ВВ) пов'язано з необхідністю автоматизації процесу оперативного керування режимами електроенергетичних систем в умовах продовження експлуатації зношеного високовольтного обладнання (ВО) підприємств енергетичної та інших галузей. Тому, мета статті полягає у вдосконаленні методу визначення технічного стану високовольтних вводів шляхом одночасного врахування як результатів періодичного, так і поточного контролю діагностичних параметрів, що забезпечується засобами нечіткого моделювання для розрахунку їх залишкового ресурсу і дозволяє враховувати поточний стан ВВ в темпі процесу оперативного керування режимами ЕЕС.

Аналіз пошкоджуваності

За останні 10 років намітилася підвищена аварійність, що досягла 4,72 % герметичних реакторних вводів типу ГМБР-750/315, які використовуються у реакторах 750 кВ, і пов'язана з перекриттям ізоляції нижньої половини вводу по внутрішній поверхні фарфорової покришки [1]. Істотно менша кількість пошкоджень такого типу (0,92 %) має місце в вводах подібної конструкції для реакторів класу напруги 500 кВ. Аналіз можливих причин виникнення таких аварій дозволяє зробити припущення, що основною причиною перекриття внутрішньої ізоляції вводу є старіння масла в каналі вводу, що призводить до істотного зниження його електричної міцності до такого рівня, коли запасу міцності, закладеного в конструкцію, стає вже недостатньо для компенсації цього зниження. Одним з шляхів апробації цього припущення може бути порівняльна оцінка запасів електричної міцності внутрішньої ізоляції реакторних вводів 750 і 500 кВ в умовах роботи їх у реакторі з урахуванням зниження цих запасів при погіршенні характеристик масла. Аналіз можливих дефектів у вводах та їх походження наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Дефекти у вводах та їх походження

Вид дефекту	Характерні приклади
1	2
Часткові розряди	Часткові розряди в газових порожнинах, що виникають через підвищену вологість, недопросочення остова, утворення Х-воску, наявність неоднорідності в порцеляні покришки.
Розряди малої енергії	Розряди в маслі, наприклад з металевої підпорної гайки остова. Іскріння навколо послабленого з'єднання вимірювального виводу. Розряди через послаблення з'єднання нульової обкладки, в зоні краю заземлюваної обкладки при незадовільному екрануванні; підвищеної місцевої напруженості поля.

Продовження табл. 1

1	2
Розряди великої енергії	Часткові пробої між конденсаторними обкладками, як наслідок теплового або електричного руйнування ізоляції. Ковзаючі розряди вздовж поверхні остова та покришки.
Нагрів з температурою нижче 300°С	Діелектричний перегрів ізоляції. Передача тепла з зони нагріву струмоведучого відводу.
Нагрів з температурою 300–700°С	Наявність короткозамкненого контуру з великим струмом в головці ввода. Погіршення контакту між стумопровідними трубами.

Математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу ВВМВ

Пропонуємо терм-множинам T_i присвоїти лінгвістичні значення, які ідентифікують концентрацію газу: T_R – нехарактерний газ [2]; T_{LR1} – мала концентрація газу; T_{LR2} – висока концентрація газу; T_L – основний газ[2].

$$G^i = < T'_R, T'_{LR1}, T'_{LR2}, T'_L > , \quad (1)$$

де i – номер газу: 1 – водень (H_2), 2 – метан (CH_4), 3 – етан (C_2H_6), 4 – етилен (C_2H_4), 5 – ацетилен (C_2H_2), 6 – оксид вуглецю (CO), 7 – вуглекислий газ (CO_2) і т.п.; T=μ(x) – терм-множина, що характеризується лінгвістичною змінною та значенням функції приналежності μ до відповідної нечіткої множини концентрацій газів (x), а значення функції приналежності μ результату вимірювань досліджуваного газу до відповідної нечіткої множини концентрацій газу, в свою чергу, залежить від концентрації газу x; $R = f(\beta)$, $L = f(\alpha)$, $LR = f(\alpha, \beta)$ – види нечітких множин з функціями належності, графіки яких мають трикутну форму (рис.1) [3]. Ці графіки мають, відповідно, праву, або ліву спадаючу частини (характеризуються параметрами α або β), а також мають дві спадаючі частини (характеризуються параметрами α та β) [4].

Віднесення отриманих результатів ХАРГ до відповідних нечітких множин з найбільшими значеннями функцій належності, порівняння отриманих результатів із нормами (з використанням) дозволяє зробити висновок про наявність або відсутність внутрішніх пошкоджень в ВУ. На основі нормативних даних складені таблиці терм-множин норм газів, що виділяються при різних внутрішніх дефектах у ВВМВ (табл. 2), і дефектів, які визначаються по сполученнях цих терм-множин (табл. 3). Дефекти ідентифікуються класом k і номером j.

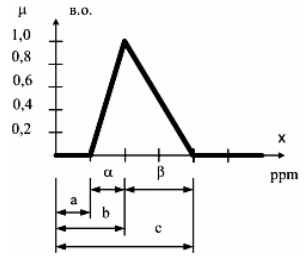

Рис. 1. Графік функції належності трикутної форми

Для прогнозування можливості подальшого розвитку виявлених дефектів та можливості експлуатації ВВ необхідно оцінити динаміку й швидкість зміни концентрації розчинених газів.

Приклад 3. Формування бази знань. БЗ: Досвід експлуатації (ХАРГ) ЯКЩО кількість газів, що утворяться при розкладанні масла від часткових розрядів, зростає, ТО збільшується інтенсивність часткових розрядів. Пояснення. Небезпечний дефект. Газові бульбашки не встигають розчинятися в маслі, тому часткові розряди відбуваються в газовому середовищі.

Таблиця 2

Терм-множини норм газів, що виділяються при різних внутрішніх дефектах

H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2	Терм-множина дефектів $D^{(j)}_k$
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*
Руйнування масла електричними розрядами $D^{(1)}_k$							
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_{LR2}	T^5_L	T^8_R	T^9_R	$D^{(1)}_1$
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_R	T^5_{LR2}	T^8_R	T^9_R	$D^{(1)}_2$
Руйнування просоченого маслом паперу електричними розрядами $D^{(2)}_k$							
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_{LR2}	T^5_L	T^8_{LR2}	T^9_{LR2}	$D^{(2)}_1$
T^1_L	T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_R	T^5_{LR2}	T^8_{LR2}	T^9_{LR2}	$D^{(2)}_2$
Локальні перегріви в маслі $D^{(3)}_k$							
T^1_R	T^2_{LR1}	T^3_L	T^4_{LR2}	-	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_1$
T^1_{LR2}	T^2_{LR1}, T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	T^5_R	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_2$
T^1_{LR2}	T^2_{LR1}, T^2_{LR2}	T^3_R	T^4_L	T^5_{LR1}, T^5_{LR2}	T^8_R	T^9_R	$D^{(3)}_3$
T^1_R	T^2_{LR1}	T^3_L	T^4_{LR2}	_	T^8_{LR1}, T^8_{LR2}	T^9_L	$D^{(3)}_4$

Таблиця 3

Дефекти високовольтних вводів виявлені по сполученнях терм - множин газів у трансформаторному маслі

Руйнування масла електричними розрядами ($D^{(1)}_i$)	
$D^{(1)}_1$	Іскровими
$D^{(1)}_2$	Частковими
Руйнування просоченого маслом паперу електричними розрядами ($D^{(2)}_i$)	
$D^{(2)}_1$	Іскровими
$D^{(2)}_2$	Частковими
Локальні перегріви в маслі ($D^{(3)}_i$)	
$D^{(3)}_1$	до 300 ˚С
$D^{(3)}_2$	від 300 до 700 ˚С
$D^{(3)}_3$	понад 700 ˚С
$D^{(3)}_3$	понад 700 ˚С
$D^{(3)}_4$	локальний перегрів просоченого маслом паперу при температурі 300 ˚С

Дефекти ідентифікуються СУБД за поточними (таблиця 3) та нормативними значеннями діагностичних параметрів (таблиця 4). Приклад 4. Формування бази знань. ЯКЩО швидкість зростання концентрації розчиненого у маслі газу перевищує 10% на місяць, ТО розвивається небезпечний дефект. Приклад 5. Формування бази знань. ЯКЩО швидкість зростання концентрації діагностичного газу значно перевищує 10% на місяць, ТО терміново необхідно вживати заходи щодо усунення дефекту. Далі уточнюються й виявляються інші дефекти, повніше оцінюється стан ВВ. Проводяться розбирання ВВ з метою виявлення місця дефекту.

Приклад 6. Формування бази знань. БЗ: Досвід експлуатації (технічне діагностування засобами інфра-червоної техніки), ЯКЩО виявлені перегріви конструктивних елементів ВВ, ТО можливе ослаблення болтових з'єднань (апаратний затиск вводу). Необхідно виявити місця нагрів ВВ та причину пошкодження. Результати дослідження вносяться в БД і ці результати є підставою для наступного етапу діагностування. Аналітична частина другого рівня дослідження полягає в обґрунтуванні прийнятого рішення про стан ВВ та можливості його подальшої експлуатації.

Таблиця 4

Діагностичні нормативні критерії пошкоджень високовольтних вводів

CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6	C_2H_2/C_2H_4	Терм-множина дефекту $D^{(4)}_i$
1	*2*	*3*	*4*
0,1-1	≤1	<0,1	$D^{(4)}_1$
<0,1	≤1	<0,1	$D^{(4)}_2$
<0,1	≤1	0,1-3	$D^{(4)}_3$
0,1-1	≥ 1	<0,1	$D^{(4)}_4$
0,1-1	≥ 3,0	0,1-3	$D^{(4)}_5$
0,1-1	1,0÷3,0	<0,1	$D^{(4)}_6$
≥1,0	≤1	<0,1	$D^{(4)}_7$
≥1,0	1,0÷3,0	<0,1	$D^{(4)}_8$
≥1,0	≥ 3,0	<0,1	$D^{(4)}_9$

Приклад 7. Формування бази знань.

ЯКЩО при ХАРГ виявлено значну кількість CO_2, ТО можливими причинами цього можуть бути: 1) сильне старіння масла; 2) перевантаження ВВ понаднормовим струмом.

Пояснення. Необхідно враховувати дані тестового дослідження, рекомендації заводу-виробника, статистику пошкоджень ВВ даного типу, порівняльний аналіз подібних ВВ, що працюють у схожих умовах.

Приклад 8. Формування бази знань.

ЯКЩО в маслі ВВ підвищений вологовміст ТО ВВ підлягає ремонту з сушінням масла та паперово-масляної ізоляції.

На основі отриманих результатів діагностування приймається одне з рішень:

1) продовжити експлуатацію ВВ відповідно до планової системи технічного обслуговування й ремонтів. При цьому контрольовані параметри повинні відповідати вимогам нормативних документів;

2) продовжити експлуатацію ВВ з більш частими перевірками технічного стану (відхилення від норми деяких параметрів вимагають оцінки швидкості розвитку процесу на відносно тривалому відрізку часу, який може виявитись меншим за встановлений відповідними нормативами);

3) перейти до наступного рівня дослідження для визначення складу й обсягу ремонту ВВ, оскільки є дефекти, що не дозволяють продовжити експлуатацію без їх усунення шляхом ремонту ВВ з його

розбиранням.

Спеціалізована діагностика й ревізія здійснюються персоналом спеціалізованих ремонтних підрозділів або організацій. Цей рівень має велике значення для оцінки вірогідності результатів попередніх досліджень, їхнього вдосконалювання й поповнення БД і БЗ. У той же час ефективність цих заходів залежить від раніше отриманих результатів. За результатами діагностування приймається рішення про можливість та доцільність подальшої експлуатації ВВ.

Тому:

1. Інформаційна підтримка діагностування ВВ скорочує час, що витрачається на дослідження технічного стану, ревізію й ремонт ВВ, а також на виявлення та локалізацію можливих несправностей і дефектів, що розвиваються в ВВ.

2. Для підвищення ефективності інформаційної підтримки потрібно застосовувати нові методи подання й обробки необхідної різнорідної інформації.

3. Використання математичного апарату нечітких чисел дозволяє ідентично представляти й обробляти різні види кількісної і якісної, неповної, невизначеної, суперечливої й іншої інформації.

4. Інформаційні системи підтримки сприяють зменшенню обсягу робіт по діагностиці ВВ, пов'язаних з відключенням ВВ, підвищенню надійності й економічності електропостачання. У рамках проведених досліджень вдається поряд із спрощенням оцінки впливу дефектів упорядкувати рішення проблем, що виникають у життєвому циклі ВВ, який ще не перейшов у категорію непрацездатних.

Системи контролю високовольтних вводів, що існують на даний час використовують у своїх розрахунках відомі математичні моделі вводів, однак ці моделі мають досить суттєвий недолік – вони не можуть визначити і врахувати функціональні зв’язки між багатьма з їх контрольованих діагностичних параметрів одночасно, в одній математичній моделі. Задача ускладнюється в умовах неповноти початкових даних, коли частина параметрів відома на момент розрахунків, наприклад, з причин необхідності проведення додаткових досліджень. Для встановлення таких зв’язків дуже конструктивною технологію є нечітке моделювання. Таке моделювання дозволяє одержувати більш достовірні результати в порівнянні з результатами роботи існуючих систем діагностування. Якщо в результаті аналізу даних, наданих представниками цеху ремонтів ВВ, з літературних джерел чи за даними служби ізоляції і т.п. буде зібрана інформація щодо деяких причини виведення в ремонт високовольтних маслонаповнених (з паперово-масляною ізоляцією конденсаторного типу) вводів, то такі дані можна упорядкувати, наприклад так, як це показано в таблиці 5 для герметичних ВВ 330 кВ (таблиця причин виведення в ремонт ВВ не повна з метою спрощення наступних пояснень методу прогнозування визначення коефіцієнту загального залишкового ресурсу ВВ).

В таблиці 5 під контрольованим діагностичним параметром розуміємо параметр, відхилення якого від норми сприяло виведенню ВВ в ремонт або враховувалось при виведенні ВВ в ремонт. В якості діагностичних параметрів в таблиці 5 приведені: параметри, які характеризують стан паперово-масляної ізоляції, стан деталей ВВ, які відповідають за герметизацію ВВ, стан компенсатора тиску.

Параметри, які характеризують стан паперово-масляної ізоляції: W – вміст вологи в трансформаторному маслі ВВ [5], C_X – ємність паперово-масляної ізоляції [6], R – активний опір паперово-оливної ізоляції [7], $tg(\delta)$ – тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції [8], P_1 – постійне зменшення тиску у ВВМВ, яке зумовлене наявністю місць протіканням трансформаторного масла [9], P_2 – коливання величини тиску у ВВМВ при зміні температури (добові коливання тиску у ВВ, тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сильфонів ВВМВ (діапазон значень нормального тиску у ВВ визначається по графікам залежності тиску масла у вводі від температури для вводів відповідних типів), наприклад, з [9], T_1 – зростання надлишкової температури у верхній частині ВВМВ внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску, T_2 – зростання температури в області вимірювального виводу, T_3 – загальний нагрів покришки вводу, наприклад, внаслідок погіршення значень параметрів ізоляції ВВМВ [7], T_4 – нагрів верхньої частини покришки (вище з’єднання) у ВВМВ з набірними верхніми покришками, внаслідок порушень в циркуляції трансформаторного масла у ВВ [7], *ХАРГ* – понаднормована зміна вмісту розчинених в трансформаторному маслу ВВ газів, або понаднормована зміна відношень вмісту розчинених в трансформаторному маслі ВВ газів [1, 3, 9].

Проаналізувавши дані таблиці 5 та літературні джерела нами була створена схема, яка показує залежний, або не залежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВВМВ (рис.3).

На рис. 2 не показано взаємний вплив одного контрольованого діагностичного параметра на інший, а лише показано у взаємозалежний чи не у залежний спосіб ці параметри впливають на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВВ.

На рис. 3 над параметром показана відсоткова кількість виявлених дефектних вводів за даним параметром, яка наведена у відсотках від загальної кількості дефектних вводів На рис. 3 послідовно позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ВВ в ремонт, а паралельно – блоки з параметрами, які сприяють виведенню ВВ в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ВВ.

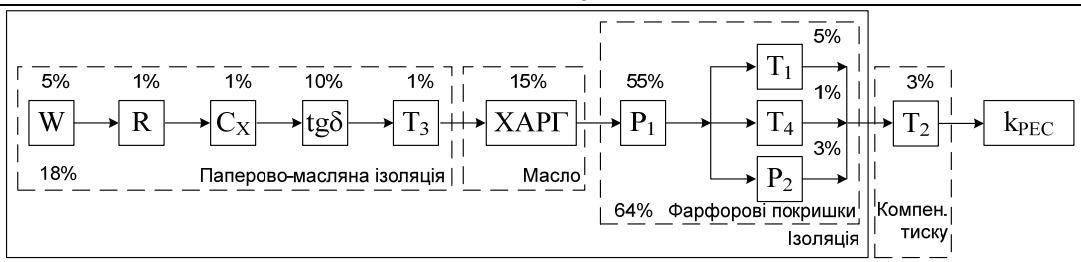

Рис. 2. Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу високовольтного вводу

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ВВ, який вираховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, пропонується від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру.

Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за виразом (2) і тому характеризують сумарне напрацювання ВВ від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто залишковий технічний ресурс [1].

Коефіцієнт залишкового ресурсу k_i по і-му діагностичному параметру:

$$k_{i1} = \left| \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,пот}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}} \right|, \tag{2}$$

де $x_{i1,гран}$ – граничне нормативне значення i_1-го діагностичного параметра, $x_{i1,пот}$ – значення i_1-го діагностичного параметра на момент контролю, $x_{i1,поч}$ – початкове значення i_1-го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту), i_1 – діагностичний параметр. Так для герметичного ВВ на клас напруги 330 кВ параметр *tg(δ)* паперово-масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,2 %, а на момент контролю дорівнював 0,4 %, граничне значення цього параметру – 1,0 % [1]. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу $k_{tg(\delta)}$ за діагностичним параметром *tg(δ)* визначається за виразом (3):

$$k_{tg(\delta)} = \left| \frac{1.0 - 0.4}{1.0 - 0.2} \right| = 0.75\,(в.о.), \tag{3}$$

У відповідності до рис.3 коефіцієнт загального залишкового ресурсу обладнання визначається за виразом (4):

$$k_{ЗАГ.РЕС} = 1 - \sum_{\Theta=1}^{\zeta} \left\{ 1 - \left\{ \prod_{\chi=1}^{\psi} \left(k_{\Theta\chi}^{P\Theta\chi} \right) \cdot \prod_{\lambda=1}^{\varphi} \left\{ 1 - \sum_{j1=1}^{m1} \left[\left(1 - k_{\Theta\lambda j1} \right) \cdot P_{\Theta\lambda j1} \right] \right\}^{P\Theta\lambda} \right\} P_{\Theta} \right\}, \tag{4}$$

де j_1 – номер блока в паралельній частині схеми, яка згортається; m_1 – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка згортається; λ – номер блока в послідовній частині схеми яка складається зі згорнутих паралельних блоків; φ – кількість блоків в послідовній частині схеми яка складається зі згорнутих паралельних блоків; χ – номер блока в послідовній частині схеми яка складається з не згорнутих блоків; ψ – кількість блоків в послідовній частині схеми яка складається з не згорнутих блоків; Θ – номер блока в паралельній частині схеми яка складається з згорнутих послідовно-паралельних блоків; ζ – кількість блоків в паралельній частині схеми, яка складається з згорнутих послідовно-паралельних блоків; $k_{\Theta\lambda j1}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу по контрольованому $\Theta\lambda j_1$-му параметру у відповідній групі паралельних блоків які в подальшому згортаються; $P_{\Theta\lambda j1}$ – ймовірність відхилення контрольованого параметра від норми у ВВ який виведений в ремонт по $\Theta\lambda j_1$ –тому параметру у відповідній групі паралельних блоків які в подальшому згортаються; $k_{\Theta\chi}$ – коефіцієнт залишкового ресурсу по діагностичному параметру у блоку який не згортається у послідовній частині; $P_{\Theta\chi}$ – ймовірність відхилення контрольованого діагностичного параметра у блоку який не згортається у послідовній частині; $P_{\Theta\lambda}$ – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі яка містить паралельні блоки у ВВ який виведений в ремонт; P_{Θ} – ймовірність відхилення групи контрольованих параметрів від норми у згорнутій групі, яка містить послідовно-паралельні блоки у ВВ, який виведений в ремонт.

У загальному випадку структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання може мати вигляд показаний на рис. 3. У відповідності до рис. 3 здійснюємо згортання схеми за наступними виразами. Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (5):

$$k_{рес} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \tag{5}$$

де k_τ – коефіцієнт залишкового ресурсу ВВ по τ-му діагностичному параметру, τ – τ-й діагностичний параметр, ν – кількість блоків у послідовній частині схеми рис. 4, p_τ – ймовірність відхилень контрольованого параметру від гранично допустимого нормованого значення цього параметра [1] (6):

$$p_\tau = \frac{y_\tau}{m_2}, \tag{6}$$

де y_τ – кількість відхилень контрольованого параметру від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю τ-го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення, m_2 – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Таблиця 5

Причини виведення в ремонт високовольтних вводів

Клас напруги, кВ	Елемент ВВ	Діагностичний параметр		Кількість ремонт/ ВВ, що мають понаднормоване значення діагност. параметра	
		Поз-ня	Назва параметра	Штук	%
330 герметичні	Паперово-масляна ізоляція	C_X	ємність паперово-масляної золяції	1	1
		W	вміст вологи	6	5
		R	активний опір ізоляції ВВ	2	1
		$Tg(\delta)$	тангенс кута діелектричних втрат в паперово-масляній ізоляції	12	10
		T_3	нагрів покришки вводу, внаслідок погіршення значень пар-ів ізоляції ВВ	2	1
	Трансформаторне масло	*ХАРГ*	за результатами хімічного аналізу розчинених в трансформаторному маслі газів	17	15
	Компенсатор тиску	T_1	зростання надлишкової температури у верхній частині ВВ внаслідок дефекту стяжного вузла компенсатора тиску	6	5
	Фарфорові покришки	P_1	постійне зменшення тиску у ВУ, яке зумовлене протіканням тр. масла	65	55
		P_2	коливання величини тиску у ВУ при зміні температури (добові коливання тиску у ВВ, тощо) навколишнього середовища, які зумовлені пошкодженням сильфонів	3	3
		T_4	нагрів верхньої частини покришки (вище з'єднання) у ВВ, внаслідок порушень в циркуляції тр. масла	2	1
	Вимірювальний вивід	T_2	зростання температури в області вимірювального виводу	3	3

Для паралельної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (7):

$$k_{рес\,\Sigma} = 1 - \sum_{j=1}^{m1} \left[\left(1 - k_{рес,\,j}\right) p_j \right], \tag{7}$$

де k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ВВ по j-му діагностичному параметру, j – j-тий діагностичний параметр, m_1 – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається (рис.4).

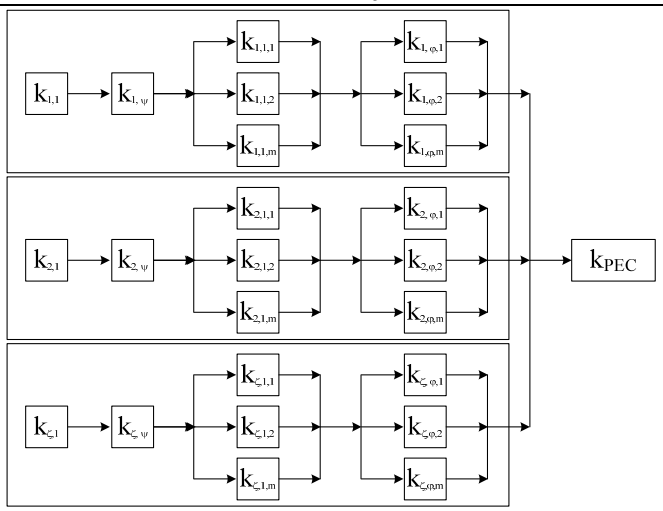

Рис. 3. Загальна структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу обладнання

У відповідності до виразів (7) і (8) та рис. 3 коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВВ визначається за виразом (9):

$$k_{заг.рес} = k_W^{p_W} \cdot k_R^{p_R} \cdot k_{C_X}^{p_{C_X}} \cdot k_{tg(\delta)}^{p_{tg(\delta)}} \cdot k_{T3}^{p_{T3}} \cdot k_{XAPГ}^{p_{XAPГ}} \cdot k_{P1}^{p_{P1}} \cdot$$
$$\cdot \left\{1 - \left[\left(1 - k_{T1}\right) \cdot p_{пар.ч.T1} + \left(1 - k_{T4}\right) \cdot p_{пар.ч.T4} + \left(1 - k_{P2}\right) \cdot p_{пар.ч.P2}\right]\right\}^{p_{УЗАГ.Ч.T1,T4,P2}} \cdot k_{T2}^{p_{T2}} \quad (8)$$

де k_W, k_R, k_{CX}, $k_{tg(\delta)}$, k_{T3}, $k_{XAPГ}$, k_{P1}, k_{T2}, k_{T1}, k_{T4}, k_{P2} – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрам W, R, C_X, $tg(\delta)$, T_3, $ХАРГ$, P_1, T_2, T_1, T_4, P_2 ; P_W, P_R, P_{Cx}, $P_{tg(\delta)}$, P_{T3}, $P_{XAPГ}$, P_{P1}, P_{T2} – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від граничних допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрах; $P_{пар.ч.T1}$, $P_{пар.ч.T2}$, $P_{пар.ч.P2}$ – ймовірності відхилень значень діагностичних параметрів від граничних допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів лише паралельної частини схеми; $P_{УЗАГ.Ч.T1,T4,P2}$ – ймовірність відхилення значень діагностичних параметрів від граничних допустимих нормованих значень для узагальненого (паралельної частини схеми) блоку (в послідовній частині схеми) з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів.

Висновки. Пошкоджуваність високовольтних маслонаповнених вводів залишається на високому, порівняно з іншими вузлами силових трансформаторів і шунтових реакторів, рівні. Вдосконаленні методу визначення технічного стану високовольтних вводів шляхом одночасного врахування, як результатів періодичного, так і поточного контролю діагностичних параметрів, що забезпечується засобами нечіткого моделювання для розрахунку їх залишкового ресурсу і дозволяє враховувати поточний стан ВВ в темпі процесу оперативного керування режимами ЕЕС та математична модель коефіцієнту залишкового ресурсу ВВМВ, яка враховує значення наступних діагностичних параметрів Її використання дозволяє прогнозувати їх поточний технічний стан з використанням результатів поточного і періодичного контролю, що важливо в умовах обмеженого часу при оперативному керуванні режимами електроенергетичних систем. Представлення прогнозованих значень параметрів у вигляді нечітких множин і використання нечітких правил у прогнозування загального залишкового ресурсу дає змогу врахувати досвід експлуатаційного персоналу при його визначенні. Розроблено структурну схему моделі коефіцієнта залишкового ресурсу високовольтного вводу.

Література

1. Технологія ремонту і експлуатації високовольтних вводів та їх конструктивні особливості / [Гуменюк О.І., Рубаненко О.Є., Остапчук О.М., Шаповалов Ю.О.]. – К. : ДП НТУКЦ Укренерго, 2012. – 552 с

2. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографіческого анализа газов, растворенніх в масле силовіх трансформаторов: РД 34.46.302-89.

3. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі: СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Офіц. Ви5. – К. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, ДП Друкарня Державного управління справами, 2007. – 124 с. – (Нормативний документ мінпаливенерго України. Методичні вказівки).

4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / Леоненков А.В.. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

5. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел, норми оцінювання якості: СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. – Офіц. Ви5. – К. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, ДП НЕК «Укренерго», Видавництво ДП «НТУКЦ АсЕлЕнерго», КВІЦ, 2007. – 149 с. – (Нормативний документ

мінпаливенерго України. Норми).

6. Технічне діагностування електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередачі засобами інфрачервоної техніки: СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. – Офіц. Ви5. – К. М-во палива та енергетики України, ДП НЕК «Укренерго», Видавництво ДП «НТУКЦ АсЕлЕнерго», КВІЦ, 2007. – 122 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Методичні вказівки).

7. Норми випробовувань електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – К. ГРІФРЕ, М-во палива та енергетики України Об'єднання енергетичних підприємств, ДП МОУ «Воєнне видавництво України «Варта», 2007 – 262 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Норми).

8. Ввод тип ГМТПА-45-330/2500 У1 ГМТПБ-45-330/2500 У1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2ШЦ.800.120 ТО. 26 с.

9. Про підвищення рівня діагностики та експлуатації оливонаповнених вимірювальних трансформаторів. Розпорядження НЕК «Укренерго» №39-р від 10 липня 2009 р.

References

1. O.I. Humeniuk, O.Ye. Rubanenko, O.M. Ostapchuk, Yu.O. Shapovalov Tekhnolohiia remontu i ekspluatatsii vysokovoltnykh vvodiv ta yikh konstruktyvni osoblyvosti. Kyiv. DP NTUKTs Ukrenerho. 2012. 552 p. ISBN: 978-966-2279-23-8.

2. Metodycheskye ukazanyia po dyahnostyke razvyvaiushchykhsia defektov po rezultatam khromatohraficheskoho analyza hazov, rastvorennikh v masle sylovikh transformatorov: RD 34.46.302-89.

3. Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannia za rezultatamy khromatohrafichnoho analizu vilnykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izoliatsiinomu masli: SOU-N EE 46.501:2006. – Ofits. Vy5. – K. HRIFRE: M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, DP Drukarnia Derzhavnoho upravlinnia spravamy, 2007. – 124 p. – (Normatyvnyi dokument minpalyvenerho Ukrainy. Metodychni vkazivky).

4. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelyrovanye v srede MATLAB y fuzzyTECH. SPb.: BKhV-Peterburh, 2003. 736 p.

5. Pryimannia, zastosuvannia ta ekspluatatsiia transformatornykh masel, normy otsiniuvannia yakosti: SOU-N EE 43.101:2009. – Ofits. Vy5. – K. HRIFRE: M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, DP NEK «Ukrenerho», Vydavnytstvo DP «NTUKTs AsElEnerho», KVITs, 2007. – 149 s. – (Normatyvnyi dokument minpalyvenerho Ukrainy. Normy).

6. Tekhnichne diahnostuvannia elektroobladnannia ta kontaktnykh ziednan elektroustanovok i povitrianykh linii elektroperedachi zasobamy infrachervonoi tekhniky: SOU-N EE 20.577:2007. – Ofits. Vy5. – K. M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy, DP NEK «Ukrenerho», Vydavnytstvo DP «NTUKTs AsElEnerho», KVITs, 2007. – 122 p. – (Normatyvnyi dokument Minpalyvenerho Ukrainy. Metodychni vkazivky).

7. Normy vyprobovuvan elektroobladnannia: SOU-N EE 20.302:2007. – K. HRIFRE, M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy Obiednannia enerhetychnykh pidpryiemstv, DP MOU «Voienne vydavnytstvo Ukrainy «Varta», 2007 – 262 s. – (Normatyvnyi dokument Minpalyvenerho Ukrainy. Normy).

8. Vvod typ HMTPA-45-330/2500 U1 HMTPB-45-330/2500 U1. Tekhnycheskoe opysanye y ynstruktsyia po эkspluatatsyy. 2ShTs.800.120 TO. 26 p.

9. Pro pidvyshchennia rivnia diahnostyky ta ekspluatatsii olyvonapovnenykh vymiriuvalnykh transformatoriv. Rozporiadzhennia NEK «Ukrenerho» #39-r vid 10.07.2009.

Рецензія/Peer review : 24.3.2013 р. Надрукована/Printed :7.4.2013 р.
Рецензент: д.т.н. Лежнюк П.Д.