

УДК 621.316.13

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ АПАРАТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

- ДОМОРОЩИН С.В. аспірант кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, інженер дільниці випробувань та вимірювань Дніпровської ГЕС-1, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;
- САХНО О.А. канд. техн. наук, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: a.sakhno@yahoo.com;

Мета роботи. Розробка математичної моделі комплексної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг з використанням апарату нечітких множин, яка ґрунтується на експертних знаннях та діагностичних даних отриманих в експлуатаційний період.

Методи дослідження. Дослідження проведено з використанням методу експертного опитування, методу вагових коефіцієнтів, методу матриць попарного порівняння Сааті, методів нечіткої логіки, теорії нечітких множин, теорії техніки високих напруг, теорії теплового випромінювання.

Отримані результати. Авторами була розроблена нечітка модель за якою визначається ймовірність відмови вентиляційного розрядника і обмежувача перенапруг з врахуванням впливу сукупності таких факторів, як стан ізоляції, стан струмопровідних нелінійних елементів, температурного стану об'єкту дослідження, кількості спрацювань апарату. На базі моделі розроблено автоматизований програмний комплекс, з використанням якого діагностувався стан обмежувача перенапруги типу ЗЕР2 276-2PF32-INA1 фірми "SIEMENS" який експлуатується на Дніпровській ГЕС-1, ВРП – 330 кВ, комірки ОПН АТ-331, та вентиляційний розрядник типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ.

Наукова новизна. Набула подальшого розвитку теорія технічного діагностування високовольтних апаратів захисту від перенапруг без відключення апаратів від мережі (онлайн) на базі нечіткої моделі визначення ймовірності відмови апарату. Від відомих моделей відрізняється тим, що враховує стан ізоляції, стан струмопровідних частин, кількість спрацювань апарату, тепловий стан апарату та контактних з'єднань, та дозволяє рахувати ймовірність відмови апарату під час його експлуатації.

Практична значимість. Розроблена математична модель може застосовуватися в автоматизованих програмних та програмно-апаратних комплексах для: діагностування, планування обслуговування та ремонтів, розподілу фінансових активів електроенергетичних підприємств. Результати діагностування різних захисних апаратів підтвердили адекватність розробленої моделі. Розроблена модель може бути застосована для всіх типів апаратів захисту розподільчих пристроїв високої напруги. Модель дозволяє комплексно оцінити технічний стан досліджуваного об'єкта, проінтегрував різні за своєю природою вхідні параметри (струм, опір, температура і т. п.) які впливають на технічний стан та ймовірність його відмови. Побудована модель дозволяє виводити апарат в ремонт по факту поточного стану об'єкта, а не за календарним графіком ремонтів, що дозволить заощадити матеріальний та людський ресурс, та з врахуванням державного курсу на оцінку ресурсу обладнання за фактичним станом та створення розподільчих пристроїв без постійного обслуговуючого персоналу дуже актуальна.

Ключові слова: апарат захисту від перенапруг; вентиляційний розрядник; обмежувач перенапруг; нечітка модель; ймовірність відмови; експертне опитування.

І. ВСТУП

Електроенергетична система України (ЕЕС) працює в умовах значного старіння парку електрообладнання. Оскільки темпи оновлення парку електрообладнання значно відстають від темпів старіння, то на деяких об'єктах електроенергетики електричне обладнання відпрацювало вже по декілька й більше нормативних строків експлуатації, що призводить до збільшення вірогідності відмов обладнання електричних станцій, підстанцій та систем. Наслідками цього є зменшення надійності ЕЕС. Старіння целюлозної ізоляції високовольтних електричних машин та апаратів

призводить до втрати механічної міцності паперової ізоляції, що внаслідок динамічних впливів на обмотки та струмопровідні контури обладнання, виникаючих під дією перенапруг або ударних струмів, може привести до руйнування ізоляції та відмовам обладнання, та ЕЕС в цілому. В зв'язку з цими обставинами забезпечення захисту ізоляції від перенапруг є важливим завданням експлуатації електроустановок.

Підвищення напруги, яке впливає на ізоляцію електрообладнання, понад найбільшого робочого значення, має як зовнішнє походження (грозові розряди), так і внутрішнє (комутаційні або аварійні режими та пов'язані з ними перехідні процеси). Апарати які за-

безпечують захист електрообладнання від всіх видів перенапруг є вентильні розрядники (ВР) та обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН). Вентильні розрядники призначені для захисту ізоляції від грозових та короткочасних комутаційних перенапруг. Обмежувачі перенапруг нелінійні призначені для захисту ізоляції електрообладнання напругою 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц від комутаційних та грозових перенапруг і мають досить стабільні захисні характеристики протягом усього строку служби [1], [2].

Згідно з [3] кожного року перед початком грозового сезону треба перевіряти стан засобів захисту від перенапруг - ВРП та ліній електропередач, та забезпечувати готовність до захисту. На підприємствах повинні реєструватися випадки грозових відключень та пошкодження повітряних ліній (ПЛ), обладнання розподільчого пристрою (РП). За отриманими даними повинна проводитись оцінка надійності грозозахисту та, за необхідності, розроблятися заходи для її підвищення. Але ж необхідно оцінювати не тільки надійність виконання своїх функцій апарату захисту від перенапруги, але й його технічний стан та ймовірність його пошкодження внаслідок значного спрацьованого ресурсу. Пошкодження ВР та ОПН можуть призводити до відключення значної кількості відповідального обладнання, внаслідок «жорсткого» приєднання (без комутаційних апаратів - вимикачів) в комірках силових трансформаторів та на збірні шини РП. Таким чином, ВР та ОПН в наслідок відмови можуть також стати причиною відмови силового або вимірювального трансформаторного обладнання, що мало низьке значення ступеню полімеризації целюлози паперової ізоляції.

Згідно [1], [2] експлуатаційний нагляд виконується наступним чином – огляд черговим персоналом з обліком спрацювання за даними реєстратора та, за наявності відповідного пристрою, контролю струмів витоку апарату (для пристроїв, що знаходяться під робочою напругою). Важливою складовою експлуатаційного нагляду є періодичні профілактичні випробування – вимірювання опору елементів захисних апаратів та струму провідності (для пристав вимкнених з експлуатації). Стан ВР та ОПН ефективно контролюється засобами інфрачервоної техніки без вимкнення апаратів з експлуатації. Але ці методи не дають можливості для комплексної, інтегрованої оцінки технічного стану (ТС) апаратів захисту від перенапруги, а здебільшого аналіз зводиться до інтуїтивної (експертної) оцінки технічного спеціаліста.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Методи оцінювання надійності та ймовірності відмови апаратів захисту від перенапруг, які існують на сьогодні різноманітні. У [4] для вибору ОПН побудована модель, яка враховує властивості та характеристики мереж (схеми, режими та засоби заземлення нейтралі, конфігурацію та склад обладнання тощо), але ця модель є більш корисною для проекту-

вальних цілей ніж для оцінювання технічного стану ОПН в поточній експлуатації. В статті [5] побудована модель для дослідження роботи засобів захисту від перенапруг в енергосистемах при наявності в них вищих гармонік, які призводять до зниження терміну експлуатації. Згідно з [9] надійна експлуатація засобів захисту від перенапруг залежить від правильного вибору характеристик засобів захисту в залежності від місця їхнього розташування. Але ці методи корисні лише на стадії проектування. Також в [9] пропонується для контролю стану ОПН проводити статистичний аналіз та узагальнення досвіду експлуатації на основі використання датчиків спрацювання ОПН при захисті обладнання. В [7]-[9] розглядаються методи діагностування технічного стану апаратів під робочою напругою. Розглянуті вище моделі базуються на рекомендаціях щодо вибору апаратів захисту (за основними характеристиками) на стадії проектування електроустановки, що є запорукою їхньої нормальної експлуатації, або досліджують ТС апаратів захисту за однією характеристикою, що не є досить об'єктивно.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою статті є розробка математичної моделі комплексної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг з використанням апарату нечітких множин, яка ґрунтується на експертних знаннях та діагностичних даних отриманих в експлуатаційний період.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

При наявності різномірної вхідної інформації, яка описує поточний стан досліджуваного об'єкта, використання фізико-математичних моделей, які б могли інтегрувати різні за своєю природою параметри впливу на цей стан, задача досить складна, а в деяких випадках і неможлива. Описання стану досліджуваного об'єкта ускладнюється також відсутністю або неповною достовірністю ретроспективних даних про функціонування даного виду обладнання, недоступністю інформації про устрій та технологію виробництва.

В якості однієї з передумов виникнення нечіткої логіки – є так званий принцип несумісності, котрий полягає в тому, що зі збільшенням розміру та складності системи, суттєво ускладнюється її моделювання за допомогою розповсюджених математичних засобів. Тому одним із засобів подолання цієї проблеми є використання нечіткої логіки для наближеної оцінки стану об'єкта. Побудова нечітких моделей на базі експертних знань, проведення операцій з використанням нечітких логічних правил, отримання на їхній основі нечітких висновків та приведення їх до чіткості.

Для визначення ймовірності відмови апарату захисту від перенапруги, пропонується використання параметрів згідно з [1], [2], за якими визначають ТС та ймовірність відмови апарату:

- опір елементів апаратів захисту;

- струм провідності апаратів захисту;
- контроль апаратів захисту за допомогою інфрачервоної техніки;
- контроль пропускної спроможності апарату від дії імпульсів гранично допустимих струмів.

Контроль цих параметрів обумовлений наявністю виникнення таких дефектів:

- зволоження нелінійних робочих елементів (вілітових дисків у ВР та окисно-цинкових дискових опорів у ОПН);
- пробій шлюдяної ізоляційної прокладки в іскрових проміжках у ВР;
- руйнування шунтуючих резисторів для розподілення напруги по блокам іскрових проміжків;
- окислення поверхонь зерен карборунду у ВР та металізованих поверхонь окисно-цинкових дискових опорів у ОПН.

Більш різка нелінійність вольт-амперної характеристики ОПН дозволила видалити з його схеми іскрові проміжки, та дало можливість безпосереднього приєднання апарату до обладнання яке захищається. Це значно підвищує його надійність та зменшує габаритні розміри в порівнянні з ВР одного класу напруги [10], [11].

В загальному вигляді нечітка модель має наступну структуру [12]:

- функції приналежності (ФП) вхідних і вихідних змінних – $f(P)$;
- база нечітких правил виду «ЯКЩО – ТО» з ваговими коефіцієнтами $W - R(W)$;
- механізм нечіткого виводу, який реалізує логічні операції і використовує правила виду «ЯКЩО – ТО» для відображення вхідних нечітких змінних в нечітку вихідну змінну – M ;
- метод дефазифікації – D .

Тоді нечітка вихідна множина станів об'єкта S визначається із співвідношення:

$$S = F(f(P), R(W), M, D, A). \quad (1)$$

Лінгвістичні змінні A визначаються на універсальних множинах вхідних змінних $X_i = [x_i, x_i], i = \overline{1, k}$.

Лінгвістична змінна S визначається на універсальних множинах вихідних змінних $Y_i = [y_i, y_i]$

Вводяться терм множини вхідних лінгвістичних змінних $A = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{iq}\}, i = \overline{1, k}$ і терм множина вихідної лінгвістичної змінної $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

Однією з основних задач в побудові нечіткої моделі – є визначення виду і кількості термів функцій приналежності, ступеня приналежності вхідних та вихідної лінгвістичної змінної відповідним нечітким терм множинам ФП $f(P)$. ФП зручно задавати в параметричній формі, тому їхня побудова зводиться до визначення параметрів [13]. Якщо відомі інтервальні значення (початкове та допустиме), то використовує-

мо лінійну апроксимацію. В цьому випадку параметр можна розглядати трикутною або трапецевидною формою ФП:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & b \geq x > a, \\ \frac{c-x}{c-b}, & c > x > b, \\ 0, & x < a, x > c; \end{cases} \quad (2)$$

- трикутна (рис. 1).

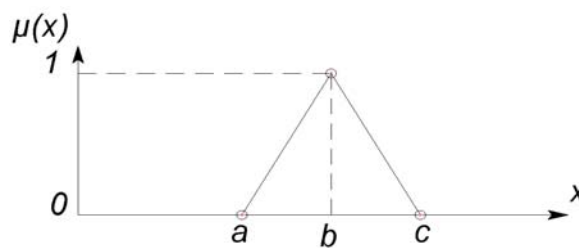


Рисунок 1. Трикутна форма ФП.

$$\mu(x, a, b, c, d) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & b \geq x > a, \\ 1, & c > x > b, \\ \frac{d-x}{d-c}, & d > x > c, \\ 0, & x < a, x > d; \end{cases} \quad (3)$$

- трапецевидна (рис. 2).

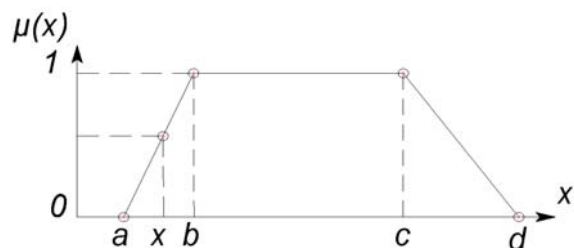


Рисунок 2. Трапецевидна форма ФП.

Для визначення параметрів ФП вхідних лінгвістичних змінних користуємося методом експертних оцінок. Ступень приналежності нечіткій множині A_i визначаємо методом парних порівнянь Сааті [14]. Для визначення параметрів ФП вихідних лінгвістичних змінних користуємося шкалою бажаності Харрінгтона відмітки якої отримані на основі статистичного аналізу великого масиву даних та мають універсальне застосування [15]. Діапазон термів нечіткої вихідної лінгвістичної змінної наведений в табл.1.

Побудова ФП методом Сааті полягає в наступному:

- експерт, для кожної пари елементів універсальної множини, виконує оцінку переваги одного

- елементу над іншим за властивостями нечіткої множини по шкалі парних порівнянь Сааті [16];
- парні порівняння записуються у вигляді матриці $\Lambda = [\lambda_{ij}]$ де λ_{ij} – рівень переваги i -того елемента над j -тим, $\lambda_{ij} = 1/\lambda_{ji}, \lambda_{ii} = 1$;
 - ступені приналежності приймають рівними відповідним координатам власного вектора $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ матриці парних порівнянь W .

Таблиця 1. Шкала інтервалів бажаності Харрінгтона.

№	Бажаність	Чисельне значення
1	Висока	0,8-0,1
2	Середньовисока	0,64-0,8
3	Середня	0,36-0,64
4	Середньонизька	0,2-0,36
5	Низька	0,0-0,2

Власний вектор визначається системою рівнянь:

$$\begin{cases} (\Lambda - \lambda E)W = 0, \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1. \end{cases} \quad (4)$$

де λ – найбільше власне число матриці Λ ; E – одинична матриця розмірності $(n \times n)$.

Дефазифікацію виконано на основі методу центру ваги або центру площ [13]. Приблизна модифікація центру ваги:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)}. \quad (5)$$

Отримана за допомогою нечіткої моделі, яка базується на використанні правил нечіткого логічного висновку, величина S кількісно характеризує ймовірність відмови апарату захисту, залежно від стану контрольованих параметрів.

Приклад та результати

Всі основні експлуатаційні фактори за своєю фізичною природою поділяються на наступні:

- електричні;
- теплові;
- механічні;
- хімічні.

Контроль стану апаратів захисту (ВР та ОПН), який змінюється під дією цих факторів, здійснюється наступним чином: механічні та хімічні контролюються експлуатаційним наглядом (наявність тріщин та сколів, корозії, забруднень, також зняття показів реєстраторів спрацювання тощо), електричні та теплові

контролюються періодичними випробуваннями (контроль електричних параметрів), контролем теплового стану засобами інфрачервоної техніки [10], [11].

Згідно [10], [11], виділяються основні контрольовані експлуатаційні параметри за якими буде побудована нечітка модель визначення ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг:

- вимірювання опору елементів ВР, ОПН;
- вимірювання струму провідності за випрямленої напруги;
- контроль теплового стану елементів за допомогою інфрачервоної техніки;
- кількість спрацювань апаратів захисту (за даними реєстратора спрацювань).

Для використання обраних параметрів, при розв'язанні задачі оцінки стану апарату захисту від перенапруг для визначення ймовірності відмови за нечіткою моделлю, обрано наступні вхідні лінгвістичні змінні:

- A_1 = «Значення опору елемента»;
- A_2 = «Значення струму провідності елемента»;
- A_3 = «Надлишкова температурна різниця»;
- A_4 = «Кількість спрацювань апарата».

Для кожної лінгвістичної змінної введені наступні нечіткі терми:

- A_1 : AH_1 = «Аварійно низьке», D_1 = «Допустиме», B_1 = «Високе»;
- A_2 : H_2 = «Низьке», D_2 = «Допустиме», AB_2 = «Аварійно високе»;
- A_3 : P_3 = «Початкова», P_3 = «Розвинена»;
- A_4 : D_4 = «Допустима», B_4 = «Висока».

Вихідну множину ймовірності подій S описано лінгвістичною змінною «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг». Терми вихідної змінної та їхні інтервали визначено за стандартними відмітками вербально-числової шкали Харрінгтона:

- B = «Висока ймовірність відмови» (0,8; 1,0];
- CB = «Середньовисока ймовірність відмови» (0,64; 0,8];
- C = «Середня ймовірність відмови» (0,36; 0,64];
- CH = «Середньонизька ймовірність відмови» (0,2; 0,36];
- H = «Низька ймовірність відмови» [0,0; 0,2].

База правил для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг формується на основі експертних знань характеристик та процесів досліджуваного об'єкта. В даній моделі вона представляє собою набір із 36 продукційних правил наступного типу: «ЯКЩО значення опору елемента $A_1 = \{AH_1, D_1, B_1\}$ ТА значення струму провідності елемента $A_2 = \{H_2, D_2, AB_2\}$ ТА поміж елементна температурна різниця $A_3 = \{P_3, P_3\}$ ТА кількість спрацювань апарата $A_4 = \{D_4, B_4\}$, ТО суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг $S = \{B, CB, C, CH, H\}$ ».

Сформована загальна база правил для оцінки

ймовірності відмови апарату наведена в табл. 2.

Структурна схема розробленої нечіткої моделі для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг представлена на рис. 2.

Для ОПН в яких нелінійні робочі резистори виготовляються з оксиду цинку з більш високою нелінійною характеристикою, на відміну від ВР, де використовується карбід кремнію зі зв'язкою із рідкого скла така вхідна характеристика як кількість спрацювань апарата не є впливовою [1], [2]. Завдяки гнучкості розробленої нечіткої моделі даний експлуатаційний параметр для оцінки ймовірності відмови ОПН не використовується. База правил для оцінки ймовірності відмови ОПН наведена в табл. 3.

Для достовірної оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг необхідно виконати настройку параметрів ФП вхідних та вихідних лінгвіс-

тичних змінних. У зв'язку з відсутністю достатньої кількості статистичних даних про вплив факторів на ТС апарату захисту, яка б дала нам можливість з високою мірою оцінити ймовірність його відмови, настройку параметрів ФП вхідних лінгвістичних змінних виконаємо за допомогою експертних опитувань. Для побудови ФП нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних A_1, A_2, A_3, A_4 опитано 9 експертів які мають досвід роботи в службах діагностування стану електротехнічного обладнання підприємств ПрАТ «Укргідроенерго», ДП НЕК «Укренерго» ДнЕС, ПрАТ «Запоріжжяобленерго». При опитуванні всі розмірності визначені в умовних одиницях в межах нормованих інтервальних значень апаратів захисту. Результати обробки експертних опитувань приведені в табл. 4.

Таблиця 2. Загальна база правил для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг.

A_4	D_4				B_4			
A_3								
P_3	A_2	H_2	D_2	AB_2	A_2	H_2	D_2	AB_2
	A_1				A_1			
	B_1	CH	CH	CB	B_1	CH	CH	CB
	D_1	CH	H	B	D_1	CH	CH	B
	AN_1	CB	CB	B	AN_1	CB	CB	B
P_3	A_2	H_2	D_2	AB_2	A_2	H_2	D_2	AB_2
	A_1				A_1			
	B_1	C	C	B	B_1	CB	CB	B
	D_1	C	CH	B	D_1	C	C	B
	AN_1	CB	B	B	AN_1	CB	B	B



Rel. – значення опору елемента апарата захисту; *Inp.* – значення струму провідності апарата захисту; *Δt_{ел.}* – надлишкова температурна різниця; *N_{спр.}* – кількість спрацювань апарата; *F Rel.* – лінгвістична змінна «Значення опору елемента»; *F Inp.* – лінгвістична змінна «Значення струму провідності елемента»; *F Δt_{ел.}* – лінгвістична змінна «Надлишкова температурна різниця»; *F N_{спр.}* – лінгвістична змінна «Кількість спрацювань апарата»; *FS* – лінгвістична змінна «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг»; *S* – значення суб'єктивної ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг.

Рисунок 3. Нечітка модель для оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг:

Згідно (4) визначені ступені приналежності значень вхідних лінгвістичних змінних нечітким термам. Результати розрахунків зведені в табл. 5-8.

ФП нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних будемо згідно (2), (3), ФП нечітких термів вихідної змінної «Суб'єктивна ймовірність відмови апарата»

ту захисту від перенапруг» визначається на стандартних інтервалах вербально-числової шкали Харрінгто-

на. Графічне зображення ФП нечітких термів лінгвістичних змінних представлені на рис. 3-7.

Таблиця 3. База правил для оцінки ймовірності відмови ОПН.

A ₃							
П ₃				Р ₃			
A ₂	H ₂	Д ₂	AB ₂	A ₂	H ₂	Д ₂	AB ₂
A ₁				A ₁			
B ₁	CH	CH	CB	B ₁	CB	CB	B
Д ₁	CH	H	B	Д ₁	C	C	B
АН ₁	CB	CB	B	АН ₁	CB	B	B

Таблиця 4. Результати обробки експертних оцінок.

A ₁ = «Значення опору елемента»						
R _{ел.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
АН ₁ = «Аварійно низьке»	9	5	0	0	0	0
Д ₁ = «Допустиме»	0	4	9	9	7	0
В ₁ = «Високе»	0	0	0	0	2	9
A ₂ = «Значення струму провідності елемента»						
I _{пр.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
H ₂ = «Низьке»	9	7	0	0	0	0
Д ₂ = «Допустиме»	0	2	9	9	1	0
AB ₂ = «Аварійно високе»	0	0	0	0	8	9
A ₃ = «Надлишкова температурна різниця»						
Δt _{ел.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
П ₃ = «Початкова»	9	9	7	3	0	0
Р ₃ = «Розвинена»	0	0	2	6	9	9
A ₄ = «Кількість спрацювань апарата»						
N _{спр.} , в.о.	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Д ₄ = «Допустима»	9	9	9	8	2	0
В ₄ = «Висока»	0	0	0	1	7	9

Таблиця 5. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Значення опору елемента».

R _{ел.}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ _{аварійно низьке} (R _{ел.})	1	0,557	0	0	0	0
μ _{допустиме} (R _{ел.})	0	0,443	1	1	0,776	0
μ _{високе} (R _{ел.})	0	0	0	0	0,224	1

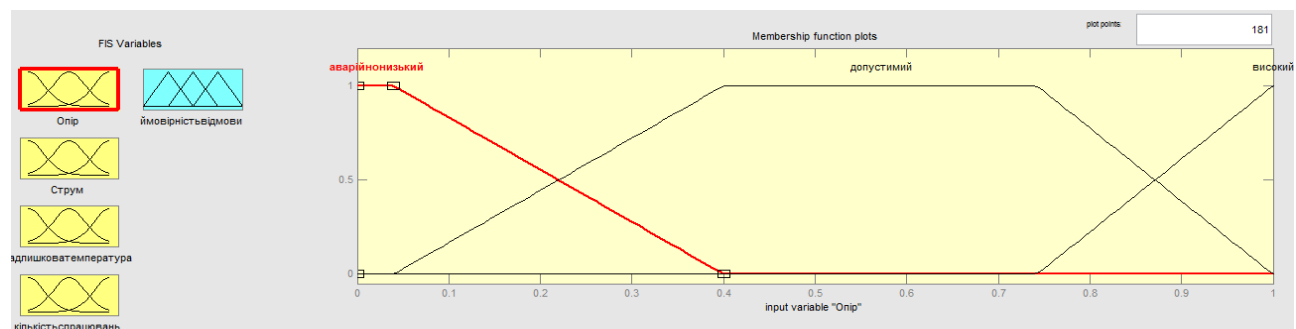


Рисунок 4. ФП термів лінгвістичної змінної «Значення опору елемента».

Таблиця 6. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Значення струму провідності елемента».

$I_{пр.}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{низьке}}(I_{пр.})$	1	0,778	0	0	0	0
$\mu_{\text{допустиме}}(I_{пр.})$	0	0,222	1	1	0,111	0
$\mu_{\text{аварійно високе}}(I_{пр.})$	0	0	0	0	0,889	1

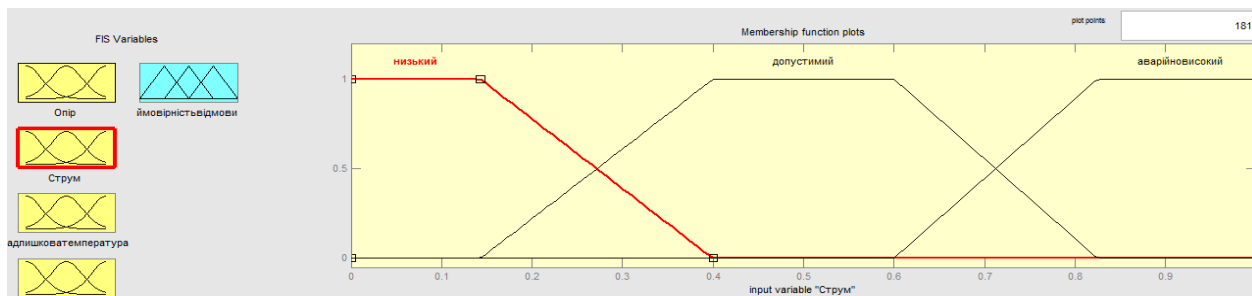


Рисунок 5. ФП термів лінгвістичної змінної «Значення струму провідності елемента».

Таблиця 7. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Надлишкова температурна різниця».

$\Delta t_{\text{ел.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{початкова}}(I_{пр.})$	1	1	0,779	0,333	0	0
$\Delta t_{\text{ел.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{розвинена}}(I_{пр.})$	0	0	0,221	0,667	1	1

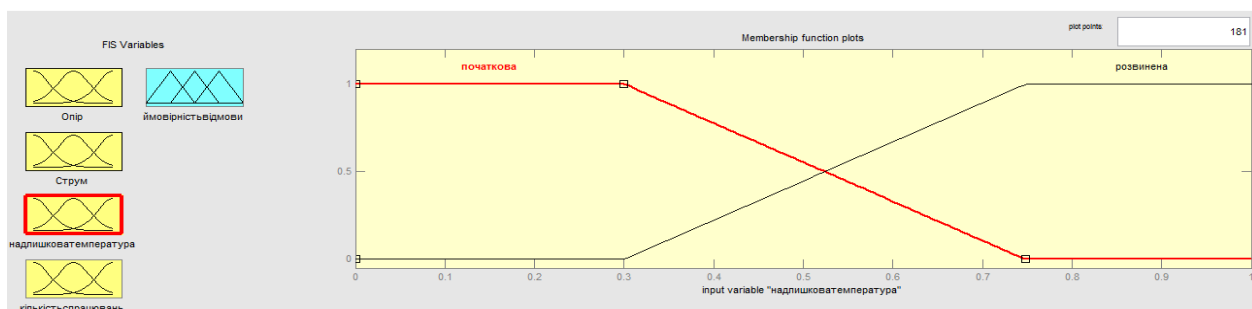


Рисунок 6. ФП термів лінгвістичної змінної «Надлишкова температурна різниця».

Таблиця 8. Ступені приналежності нечітким термам значень вхідної величини «Кількість спрацювань апарата».

$N_{\text{спр.}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
$\mu_{\text{допустима}}(I_{пр.})$	1	1	1	0,890	0,223	0
$\mu_{\text{висока}}(I_{пр.})$	0	0	0	0,110	0,777	1

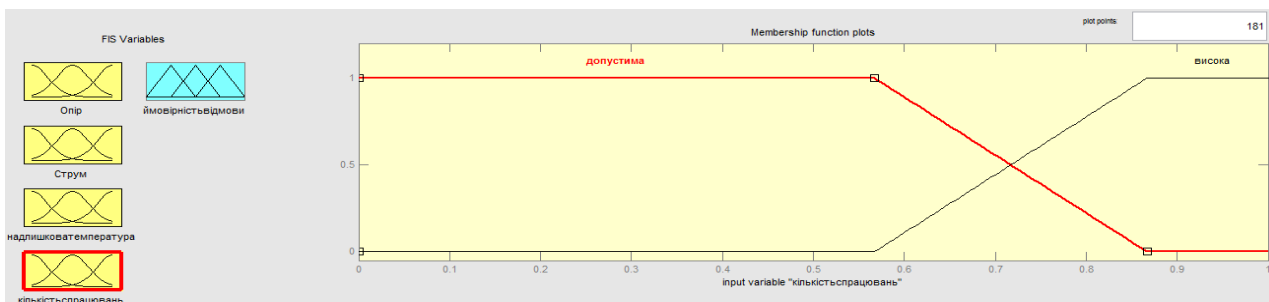


Рисунок 7. ФП термів лінгвістичної змінної «Кількість спрацювань апарата».

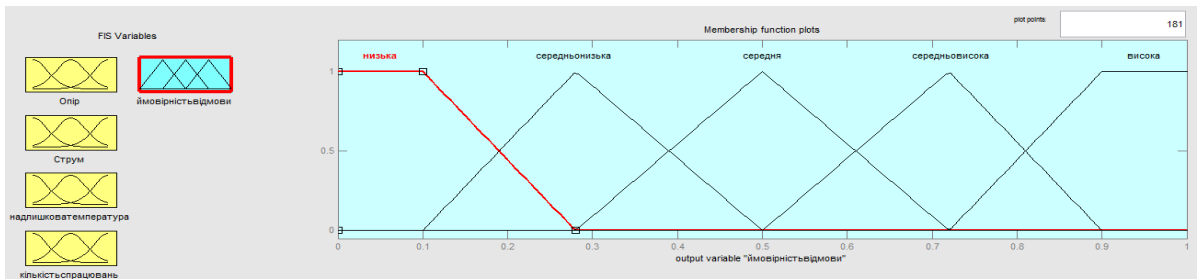


Рисунок 8. ФП термів лінгвістичної змінної «Суб'єктивна ймовірність відмови апарату захисту від перенапруг»

На ПС «Дніпровська - 750» в ході тепловізійного обстеження було виявлено підозру на дефект розрядника типу РВМК – 750М в комірці РВ 750 2АТ ф.-«А» рис. 8.

Розрядник був виведений з експлуатації для позапланових випробувань, результати яких зведені до табл.9. Нормативні значення вимірних характеристик приведені згідно [1], [2], [17], [18].

За вимірними характеристиками виконаємо оцінку ймовірності відмови розрядника за розробленою нечіткою моделлю. Згідно вимірних і нормативних значень переведемо виміряні показники з іменованих в відносні одиниці:

- значення опору елемента $R_{el.} > 1,0$ в.о.;
- значення струму провідності елемента $I_{пр.} = 0,125$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{el.} > 1,0$ в.о.;
- кількість спрацювань апарата $N_{спр.} = 0,59$ в.о.

Оцінка ймовірності відмови апарату захисту виконується за допомогою пакету MATLAB Fuzzy Logic

Toolbox, яка представлена на рис. 9. Значення отриманої ймовірності відмови розрядника:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,518, \hat{a}.i.$$

На ПС Правобережна-330 кВ Дніпровської ГЕС-1 виконано оцінку ймовірності відмови обмежувача перенапруги ОПН – 330 кВ комірці ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS». В комірці АТ – 331 ф. «С» на протязі чотирьох років двічі відбувалося коротке замикання на землю за помилкою обслуговуючого персоналу. Оцінку виконано за розробленою нечіткою моделлю, без виводу обладнання з експлуатації. Характеристики за якими визначено ймовірність відмови апарату захисту отримані за даними термограмами елементів ОПН (рис. 10 а; рис. 10 б; рис. 10 в), показами

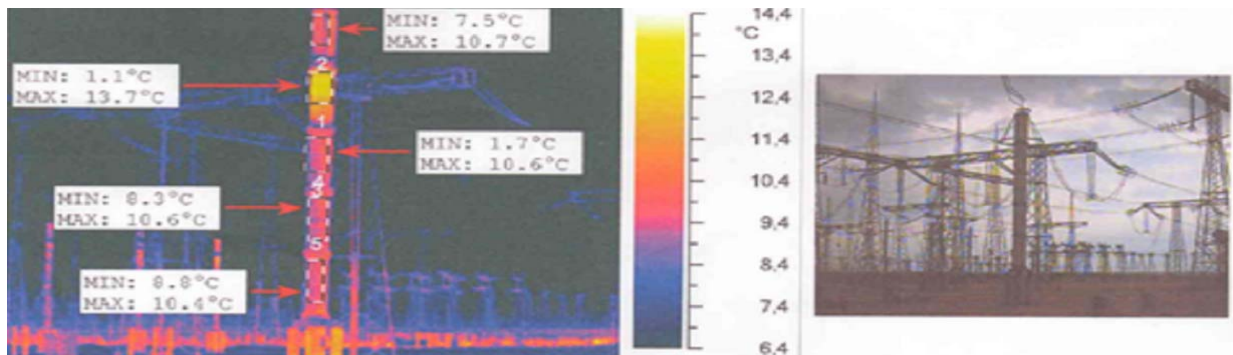


Рисунок 9. Термограма розрядника типу РВМК – 750М комірці РВ 750 2АТ ф.-«А».

Таблиця 9. Результати позапланових випробувань розрядника типу РВМК – 750М комірці РВ 750 2АТ ф.-«А».

Найменування підстанції	Диспетчерське найменування	Значення опору елемента, МОм		Значення струму провідності елемента, мкА		Надлишкова температурна різниця, °С		Кількість спрацювань (за даними ресстратора), одиниць.	
		Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Зареєстровано	Нормативне
1	2	3		4		5		6	
ПС – Дніпровська – 750 кВ	РВ 750 2АТ ф.-«А»	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Зареєстровано	Нормативне
		8500	Від 1300 до 7000	260	Від 250 до 330	12,6	Не більш 2,0 °С	11	20

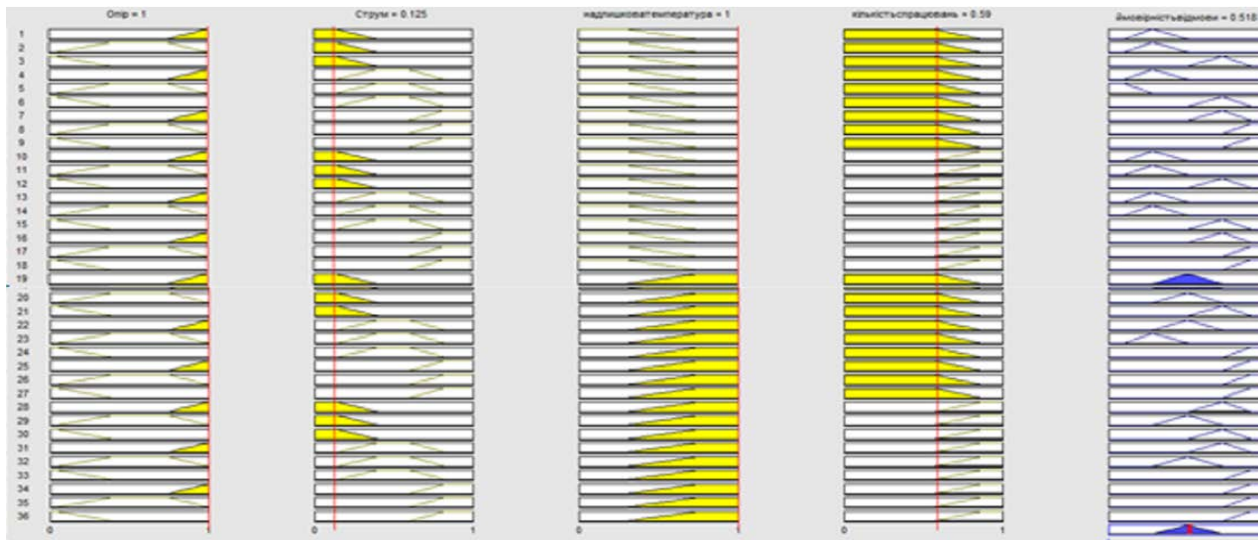


Рисунок 10. Оцінка ймовірності відмови розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А» ПС Дніпровська – 750 кВ.

Згідно вимірних і нормативних значень переведемо виміряні показники з іменованих в відносні одиниці:

- значення опору елемента $R_{el.}=0,429$ в.о.;
- значення струму провідності елемента $I_{пр}=0,083$ в.о.;
- надлишкова температурна різниця $\Delta t_{el.}=0,2$ в.о.;

Оцінка ймовірності відмови апарату захисту ви-

конується за допомогою пакету MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, яка представлена на рис.11. Значення отриманої ймовірності відмови обмежувача перенапруг:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i(s) \cdot s_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i(s)} = 0,293 \text{ в.о.}$$

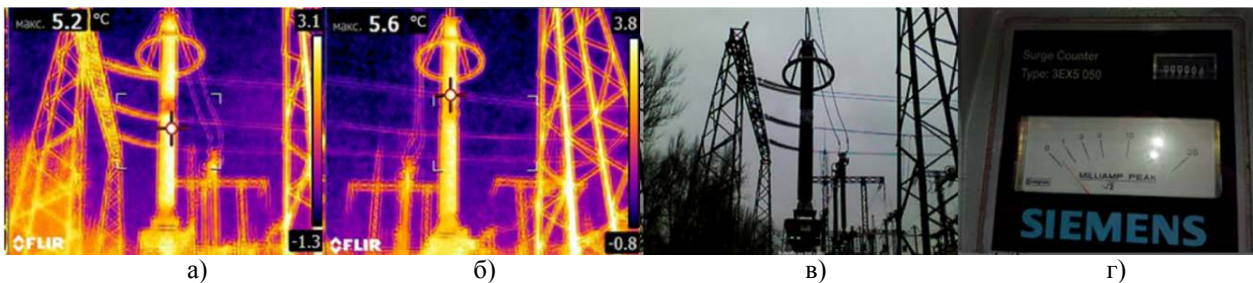


Рисунок 11. Термограма обмежувача перенапруг з показниками реєстратора спрацювань з токовою індикацією комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1.

Таблиця 10. Результати вимірних характеристик обмежувача перенапруг фірми «SIEMENS» комірки ОПН АТ - 331 ф.-«С».

Найменування підстанції	Диспетчерське найменування	Значення опору елемента, МОм		Значення струму провідності елемента, мкА		Надлишкова температурна різниця, 0С	
		Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне	Виміряне	Нормативне
ПС – Правобережна – 330 кВ	ОПН АТ - 331 ф.-«С»	6000	Від 3000 до 10000	250	Від 0 до 3000	0,4	Не більш 2,0 0С

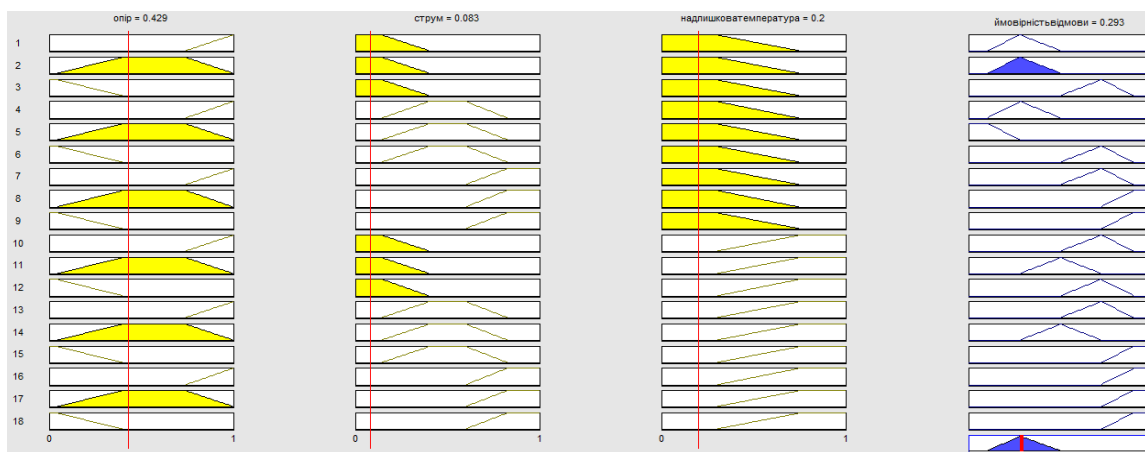


Рисунок 12. Оцінка ймовірності відмови обмежувача перенапруг комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1.

V. ВИСНОВКИ

Набула подальшого розвитку теорія технічного діагностування високовольтних апаратів захисту від перенапруг без відключення апаратів від мережі (онлайн) на базі нечіткої моделі визначення ймовірності відмови апарату. Від відомих моделей відрізняється тим, що враховує стан ізоляції, стан струмопровідних частин, кількість спрацювань апарату, тепловий стан апарату та контактних з'єднань, та дозволяє рахувати ймовірність відмови апарату під час його експлуатації. Розроблена математична модель може застосовуватися в автоматизованих програмних та програмно-апаратних комплексах для: діагностування, планування обслуговування та ремонтів, розподілу фінансових активів електроенергетичних підприємств. Розроблена нечітка модель оцінки ймовірності відмови апарату захисту від перенапруг може бути застосована для всіх типів апаратів захисту розподільчих пристроїв високої напруги.

На базі моделі розроблено автоматизований програмний комплекс, з використанням якого діагностувався стан обмежувача перенапруги типу ЗЕР2 276-2PF32-1NA1 фірми «SIEMENS», який експлуатується на Дніпровській ГЕС-1, ВРП-330 кВ, комірки ОПН АТ-331, та вентиляний розрядник типу РВМК-750М комірки РВ 750 2АТ. Була оцінена ймовірність відмови розрядника типу РВМК – 750М комірки РВ 750 2АТ ф.-«А», яка виявилась рівною $S=0,518$ в.о. Виходячи з того, що по побудованій нечіткій моделі при $S=1,0$ в.о. відбувається повна відмова обладнання, тобто аварія з пошкодженням обладнання, технічним керівником було прийнято рішення про вивід обладнання з роботи для обстеження його окремих вузлів. При обстеженні було виявлено дефект у вигляді значного окислення контактів шунтуючих опорів основного елемента розрядника. Також була проведена оцінка ймовірності відмови обмежувача перенапруг комірки ОПН АТ – 331 ф. «С» фірми «SIEMENS» ПС Правобережна – 330 кВ Дніпровської ГЕС-1 без виводу апарату з роботи, який останній термін експлуатації працював в важких умовах і потребував оцінки

його технічного стану. За розробленою нечіткою моделлю технічний стан ОПН склав $S=0,293$ в.о., без відхилень по вхідним контрольованим параметрам. Контроль технічного стану ОПН продовжено без виводу з експлуатації. Результати діагностування різних захисних апаратів підтвердили адекватність розробленої моделі.

Побудова цієї моделі потребує експертного досвіду в експлуатації та діагностуванні технічного стану апарату захисту, але не потребує досконалого знання технології виробництва та наявності ретроспективної інформації про функціонування об'єкта дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Засоби захисту від перенапруг у електроустановках 6-750 кВ. [Текст]: Інструкція з монтажу та експлуатації. М-вом палива та енергетики України 20.02.2002. – К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. – 138с.
- [2] Норми випробування електрообладнання [Текст]: СОУ-Н ЕЕ 20.302: 2007: затв. М-вом палива та енергетики України 15.01.2007. –К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2007. – 278с.
- [3] Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила [Текст]: ГКД 34.20.507-2003: затв. М-вом палива та енергетики України 13.06.2003. –К.: ОЕП «ГРІФРЕ», 2003. – 597с. – ISBN 966-96099-1-7.
- [4] Лебедка, С.Н. Математическое моделирование режимов работы электросетей с ОПН [Текст]/ Ю.Н. Веприк, С.Н. Лебедка // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – №3/8. – С.25-29.
- [5] Гриб, О.Г. Работа средств защиты от перенапряжения в энергосистемах при наличии высших гармоник [Текст] / О.Г. Гриб, С.Ю. Шевченко, Д.А. Гапон [и др.] / Вісник НТУ «ХП». – 2014. – № 41(1084). – С. 78-86.
- [6] Шевченко, С.Ю. Особенности защиты оборудования

- ния подстанций от перенапряжений [Текст]/ С.Ю. Шевченко, О.Н. Довгалюк, А.Е. Пиротти / Науківі праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – №1(14). – С. 308-312.
- [7] Heinrich, C. Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures [Text] / C. Heinrich, V. Hinrichsen. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – Volume 16. – Issue 1. – P. 138-143. DOI: 10.1109/61.905619.
- [8] Yu-ting, Xu. Research on On-line Monitoring of Insulation of Metal Oxide Surge Arrester [Text] / Xu Yu-ting, Xiao-hua Yuan, Ya-li MO, Guo-tai Dong and De-cheng ZHU // International Conference on Material Science and Civil Engineering. – 2016. – 328-336.
- [9] Metwally, I. A. Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current [Text] / I. A. Metwally, M. Eladawy, E. A. Feilat // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – Volume 24. – Issue 4. –P. 2274-2281. DOI:10.1109/TDEI.2017.006334/.
- [10] Чунихин, А.А. Электрические аппараты: Общий курс. Учебник для вузов. -3-е изд. переаб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
- [11] Электрические аппараты высокого напряжения: Учебное пособие для вузов [Текст] / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, В.Л. Иванов и др.; Под ред. Г.Н. Александрова. –Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 344 с.
- [12] Костерев, М.В. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем [Текст] / М.В. Костерев, Є.І. Бардік. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – 131 с.
- [13] Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – телеком, 2007. – 288 с.
- [14] Літвінов, В.В. Використання методів попарного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального вибору [Текст] / В.В. Літвінов, М.В. Костерев, П.Л. Денисюк/ Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – №2. – С. 24-29.
- [15] Ременников, В.Б. Управленческие решения [Текст] / В.Б. Ременников. Минск: Юнити, 2005. – 144 с.
- [16] Saati, T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy. [Text]/ T. Saati – М.: Radio i svyaz', 1993. – 278 p.
- [17] Гобрей, В. Чернов, Є. Удод. Діагностування електроустановок 0,4-750 кВ засобами інфрачервоної техніки. [Текст] / Навч. методичний посібник / Р. Гобрей, В. Чернов, Є. Удод. – К.: «КВІЦ», – 2007. – 374с. ISBN 978-966-96441-8-3.
- [18] Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники [Текст]: СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007: затв. М-вом палива та енергетики України 15.02.2007. – К.: ГП НЭК «Укрэнерго», 2007. – 123 с. ISBN 978-966-96441-7-6.

Стаття надійшла до редакції 06.05.2018

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА АПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

ДОМОРОШЧИН С.В. аспирант кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, инженер участка испытаний и измерений Днепровской ГЭС-1, г. Запорожье, Украина, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;

САХНО А.А. канд. техн. наук, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, г. Запорожье, Украина, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

Цель работы. Разработка математической модели комплексной оценки вероятности отказа аппарата защиты от перенапряжений с использованием аппарата нечетких множеств, которая основывается на экспертных знаниях и диагностических данных полученных в эксплуатационный период.

Методы исследования. Исследование проведено с использованием метода экспертного опроса, метода весовых коэффициентов, метода матриц попарного сравнения Саати, методов нечеткой логики, теории нечетких множеств, теории техники высоких напряжений, теории теплового излучения.

Полученные результаты. Авторами была разработана нечеткая модель по которой определяется вероятность отказа вентиляционного разрядника и ограничителя напряжения с учетом влияния совокупности таких факторов как состояние изоляции, состояние токопроводящих нелинейных элементов, температурного состояния объекта исследования, количества срабатываний аппарата. На базе модели разработан автоматизированный программный комплекс, с использованием которого диагностировалось состояние ограничителя перенапряжения типа ZEP2 276-2PF32-INA1 фирмы "SIEMENS" который эксплуатируется на Днепровской ГЭС-1, ОРУ-330 кВ, ячейки ОПН АТ-331, и вентиляционный разрядник типа РВМК-750М ячейки РВ 750 2 АТ.

Научная новизна. Приобрела дальнейшее развитие теория технического диагностирования высоковольт-

ных аппаратов защиты от перенапряжений без отключения аппаратов от сети (онлайн) на базе нечеткой модели определения вероятности отказа аппарата. От известных модель отличается тем, что учитывает состояние изоляции, состояние токопроводящих частей, количество срабатываний аппарата, тепловое состояние аппарата и контактных соединений, и позволяет рассчитывать вероятность отказа аппарата во время его эксплуатации.

Практическое значение. Разработанная математическая модель может применяться в автоматизированных программных и программно-аппаратных комплексах для: диагностирования, планирования обслуживания и ремонта, распределения финансовых активов электроэнергетических предприятий. Результаты диагностирования разных аппаратов защиты подтвердили адекватность разработанной модели. Разработанная модель может быть применена для всех типов аппаратов защиты распределительных устройств высокого напряжения. Модель позволяет комплексно оценить техническое состояние исследуемого объекта проинтегрировав различные по своей природе входящие параметры (ток, сопротивление, температура и т.д.) которые влияют на техническое состояние и вероятность его отказа. Построенная модель позволяет выводить аппарат в ремонт по факту текущего состояния объекта, а не по календарному графику ремонтов, что позволит сэкономить материальный и человеческий ресурс, и с учетом государственного курса на оценку ресурса оборудования по фактическому состоянию и создание распределительных устройств без постоянного обслуживания персонала очень актуальна.

Ключевые слова: аппарат защиты от перенапряжений; вентильный разрядник; ограничитель перенапряжения; нечеткая модель; вероятность отказа; экспертный опрос.

FUZZY MODELING OF FAILURE PROBABILITY OF APARATES FOR PROTECTION FROM OVERVOLTAGE

DOMOROSHCHYN S.V.

post-graduate of the electrical and electronic devices department of the Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, engineer of the test and measurement of the DneproHPS-1, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: domoroshchin77@gmail.com;

SAKHNO O.A.

Ph.D, Associate professor of the electrical and electronic apparatuses department of the Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: a.asakhno@yahoo.com;

Purpose. The aim of the article is to develop a mathematical model for a comprehensive assessment of the probability of failure of an overvoltage protection device using a fuzzy set device, which is based on expert knowledge and diagnostic data obtained during the operational period.

Methodology. The study was carried out using the expert survey method, weight coefficients method, Saati pair comparison matrix method, fuzzy logic methods, fuzzy sets theory, high voltage technology theory, thermal radiation theory.

Findings. The authors developed a fuzzy model for determining the probability of failure of a gate arrester and a voltage limiter, taking into account the influence of a combination of such factors as the state of insulation, the state of current-carrying nonlinear elements, the temperature state of the object under study, and the number of operations of the apparatus. On the basis of the model, an automated software system was developed, using which the state of the voltage limiter type 3ER2 276-2PF32-1NA1 of the «SIEMENS» company was diagnosed. It is operated at Dneprovskaya HPP-1, 330 kV for cell ОПН АТ-331, and arresters of type PBMK -750M for cell PB 750 2 AT.

Originality. The theory of technical diagnostics of high voltage overvoltage protection devices without disconnecting devices from the network (online) on the basis of a fuzzy model for determining the probability of failure of the device has been further developed. The known model differs from the known ones in that it takes into account the state of insulation, the state of the conductive parts, the number of operations of the apparatus, the thermal state of the apparatus and the contact connections, and allows calculating the probability of failure of the apparatus during its operation.

Practical value. The developed mathematical model can be used in automated software and hardware-software systems for: diagnosis, maintenance and repair planning, and distribution of financial assets of electric power enterprises. The results of diagnosing different protection apparatus confirmed the adequacy of the developed model. The developed model can be used for all types of protection devices for high voltage switchgears. The model makes it possible to comprehensively evaluate the technical state of the investigated object by integrating the input parameters (current, resistance, temperature, etc.) that are inherently different in nature and which affect the technical state and the probability of its failure. The constructed model allows the machine to be put out of repair after the current state of the object, and not according to the schedule of repairs, which will save the material and human resource, and taking into account the state course for estimating the equipment resource according to the actual state and creating switchgears without a permanent maintenance staff is very relevant.

Keywords: *overvoltage protection device; arrester; voltage limiter; fuzzy model; probability of failure; interviewing experts.*

REFERENCES

- [1] (2002). Zasoby zakhystu vid perenapruih u elektroustanovkakh 6-750 kV. Instruktsiia z montazhu ta ekspluatatsii. HKD 34.35.512-2002. Obiednannia enerhetychnykh pidpnyemstv "Haluzevyi rezervno-investetsiinyi fond rozvytku enerhetyky", 138.
- [2] (2009). Normy vyprovuvannia elektroobladnannia. SOU-N EE 20.302:2007. Ministerstvo palyva ta enerhetyky, 278.
- [3] (2002). Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii I merezh. Pravyla. HKD 34.20.507-2003. "LvovORHRES, HDP "DonORHRES", 341.
- [4] Lebedka, S.N. (2012). Matematicheskoe modelirovanie rezhimov raboty elektrosietey s OPN. *Skhidno-Evropeyskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 3/8, 25-29. (in Russian.)
- [5] Grib, O.G. (2014). Rabota sredstv zaschity ot perenapryazheniya v energosistemah pri nalichii vysshih garmonik. *Visnyk NTU "HPI"*, 41(1084), 78-86. (in Russian.)
- [6] Shevchenko, S. Yu. (2013). Osobennosti zaschity oborudovaniya podstantsiy ot perenapryazheniy. *Naukovi pratsi DonNTU. Elektrotekhnika i enerhetyka*, 1(14), 308-312. (in Russian.)
- [7] Heinrich, C., Hinrichsen, V. (2001). Diagnostics and monitoring of metal-oxide surge arresters in high-voltage networks-comparison of existing and newly developed procedures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16, 1, 138-143. DOI: 10.1109/61.905619.
- [8] Yu-ting XU, Xiao-hua YUAN, Ya-li MO, Guo-tai Dong and De-cheng (2016). Research on On-line Monitoring of Insulation of Metal Oxide Surge Arrester. *2016 International Conference on Material Science and Civil Engineering (MSCE 2016)*, 328-336.
- [9] Ibrahim, A. Metwally, Mohamed Eladawy, E. A. Feilat. (2017). Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24, 4, 2274-2281. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006334.
- [10] Chunihin, A.A. (1988). Elektricheskie apparaty: Obshchiy kurs. Moscow: Energoamizdat, 720.
- [11] Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Ivanov V.L. (1989). Elektricheskie apparaty vysokogo napryazheniya. Uchebnoe posobie dlya vuzov. Leningrad: Energoatomizdat, 344.
- [12] Kosteriev, M. V. (2010). Pytannia pobudovy nechitkykh modelei otsinky tekhnichnoho stanu ob'ektiv elektrychnykh system. Kyiv: NTUU "KPI", 131.
- [13] Shtovba, S.D. (2007). Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB. Moscow: Goryachaya liniya – telekom, 288.
- [14] Litvinov V.V. (2010). Vykorystannia metodiv poparnoho porivniannia dlia vyznachennia priorytetnosti sposobiv zabezpechennia statychnoi stiikosti asynkronnykh dvyhuniv v umovakh bahatokryterialnogo vuboru. *Naukovi visti NTUU "KPI"*, 2, 24-29.
- [15] Remennikov, V.B. (2005). Upravlencheskie resheniya. Minsk: Yuniti, 144.
- [16] Saati T. (1993). Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy. Moscow: Radio i svyaz', 278.
- [17] Hobrei, R., Chernov V., Udod Ye. (2007). Diagnostuvannia elektroustanovok 0,4 – 750 kV zasobamy infrachervonoj tekhniki. Kyiv: "KVITs", 374.
- [18] (2007). Tekhnicheskoe diagnostirovaniye elektrooborudovaniya i kontaknykh soedineniy elektroustanovok I vozdushnykh liniy elektroperedachi sredstvami infrakrasnoy tekhniki. SOU-N EE 20.577:2007. Ministerstvo palyva ta enerhetyky, 123