

О.Є. РУБАНЕНКО

Вінницький національний технічний університет

В.А. МАТВІЙЧУК, О.О. РУБАНЕНКО

Вінницький національний аграрний університет

## ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДІЛЯНКИ ІЗ ЗНИЖЕНИМ ОПОРОМ ІЗОЛЯЦІЇ МЕРЕЖІ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

*Досліджено можливість використання нейронечіткого моделювання при визначенні якості функціонування ділянки із зниженим опором ізоляції. Досліджено параметри, які характеризують якість функціонування ділянки мережі оперативного постійного струму: кількість відновлень ізоляції після проходження сигналів; поточний опір ізоляції ділянки; опір ізоляції ділянки після відновлення. Визначення ділянки із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму пропонується здійснювати шляхом розрахунку коефіцієнта якості її функціонування. Коефіцієнт якості функціонування ділянки мережі оперативного постійного струму є комплексним параметром, який враховує не лише можливість ділянки виконувати свої функції, а й можливість ефективно відновлювати ізоляцію після проходження тестових чи інших, впливаючих на її стан, сигналів. Вдосконалено метод визначення ділянки із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму, який дозволяє попередити розвиток аварійних ситуацій і дає змогу провести завчасну заміну, ремонт, наладку ділянок мережі оперативного постійного струму.*

*Ключові слова: коефіцієнт якості функціонування, ділянка із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму, нейронечітке моделювання.*

O.E. RUBANENKO

Vinnytsia national technical university

V.A. MATVICHUK, O.O. RUBANENKO

Vinnytsia national agrarian university

## DETERMINATION OF FUNCTIONING QUALITY OF AREA IS WITH MIONECTIC RESISTANCE ISOLATION OF OPERATIVE DIRECT-CURRENT NETWORK BY NEURO-FUZZY MODELLING

*Investigational possibility of the use of neuro-fuzzy modelling is at determination of functioning quality of area with mionectic resistance of isolation. Investigational parameters which characterize quality functioning of area of operative direct-current network: an amount of proceedings in an isolation is after passing of signals; current isolation resistance of area; resistance of area isolation is after renewal. Determination of area with mionectic isolation resistance of operative direct-current network it is suggested to carry out by a calculation the coefficient of quality of its functioning. A coefficient of functioning quality of operative direct-current network area is a complex parameter, which takes into account not only possibility of area to execute the functions but also possibility effectively to proceed in an isolation after passing of test or other influencing on its state signals. The method of determination of area is improved with mionectic isolation resistance of operative direct-current network, which allows to warn development of emergency situations and enables to conduct the done early replacement, repair, adjusting of areas of operative direct-current network. The method of determining the coefficient functioning as the operative parts of current permanent ones so using methods based on fuzzy modeling and driven to software implementation in a complex MATLAB. The advantage of this method is to attract an evaluation experience for field personnel, taking into account in calculating the quantity, quality, regulatory parameters, etc., and enable the optimization mathematical model on real data.*

*Keywords: operative direct-current network, mionectic resistance of isolation, coefficient of functioning quality, neural-fuzzy modelling.*

Мережі оперативного постійного струму (МОПС) електричних підстанцій призначені для живлення пристроїв релейного захисту і автоматики, систем сигналізації, відповідальних механізмів власних потреб, аварійного освітлення, котушок увімкнення та вимкнення високовольтних вимикачів і т.п. [1-3]. Дослідження, викладене в статті, може знайти застосування в створенні та управлінні мережами електроживлення постійним оперативним струмом споживачів, а також підприємств (електричних станцій і підстанцій), які використовують двохпровідні мережі оперативного постійного струму [3].

Існує багато способів і засобів контролю ізоляції МОПС [1-3], однак специфіка об'єкта контролю вимагає збільшення точності правильного визначення появи небезпечного зниження опору ізоляції на ранній стадії та забезпечення селективного виявлення пошкодженої кабельної лінії.

Одним із перспективних напрямків підвищення надійності МОПС є прогнозування їх стану, а саме прогнозування невідновлювального зниження опору ізоляції. Для вирішення такого класу задач прогнозування добре себе зарекомендували методи нейро-нечіткого моделювання [4, 5]. Тому метою даної статті є вдосконалення методу визначення ділянки із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму шляхом розрахунку коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС з використанням засобів нейро-нечіткого моделювання.

### Матеріал і результати дослідження.

Визначення ділянки із зниженим опором ізоляції МОПС пропонується здійснювати шляхом розрахунку коефіцієнта якості її функціонування. Коефіцієнт якості функціонування ділянки МОПС є комплексним параметром, який враховує не лише можливість ділянки МОПС виконувати свої функції, а й можливість ефективно відновлювати ізоляцію після проходження тестових чи інших, впливаючих на її стан,

сигналів. Розглянемо задачу знаходження коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС залежно від кількості знижень значення опору ізоляції, самого значення опору ізоляції ділянки МОПС та часу відновлення ізоляції ділянки МОПС після збурення (проходження сигналу):

$$k_{\text{як.функ.}} = a_{\Sigma} \cdot k_n \cdot k_z \cdot k_{\text{відн.}}, \quad (1)$$

де коефіцієнт кількості відновлень ізоляції після проходження сигналів визначається за виразом:

$$k_n = \frac{n_{\text{відн.}}}{n_{\text{сум.}}}, \quad (2)$$

$n_{\text{сум.}}$  – сумарна кількість сигналів, які пройшли через досліджувану ділянку МОПС;

$n_{\text{відн.}}$  – сумарна кількість сигналів, після проходження яких ділянка МОПС відновилась за короткий

час;

коефіцієнт опору ізоляції ділянки МОПС визначається за виразом:

$$k_z = \left| \frac{Z_{\text{гран}} - Z_{\text{ном}}}{Z_{\text{гран}} - Z_{\text{поч}}} \right|, \quad (3)$$

$Z_{\text{гран}}$  – граничне нормативне значення опору ділянки МОПС;

$Z_{\text{ном}}$  – значення опору ділянки МОПС на момент контролю;

$Z_{\text{поч}}$  – початкове значення опору ділянки МОПС (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту);

коефіцієнт відновлення опору ізоляції ділянки МОПС визначається за виразом:

$$k_{\text{відн.}} = \frac{Z_{\text{відн.}}}{Z_{\text{поч}}}, \quad (4)$$

$Z_{\text{відн.}}$  – значення опору ділянки МОПС після відновлення;

$$a_{\Sigma} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \quad (5)$$

$a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – вагові коефіцієнти, які задаються експертами з власного досвіду, що характеризують вплив того чи іншого фактора в залежності від особливостей ділянки МОПС і враховують особливості умов експлуатації, а саме  $a_1$  – коефіцієнт, який, враховує вплив кількості відновлень після проходження сигналів;  $a_2$  – коефіцієнт, який, враховує вплив опору ізоляції ділянки МОПС;  $a_3$  – коефіцієнт, який, враховує вплив відновлення опору ізоляції ділянки МОПС.

Для прогнозування можливості подальшого розвитку виявлених дефектів та можливості експлуатації ділянки МОПС необхідно оцінити динаміку й швидкість зміни опору ізоляції. З метою підвищення адекватності проведення подібного оцінювання виникає потреба у врахуванні експертних знань у предметній області. Прикладом подібних експертних суджень, які можуть стати підґрунтям формування бази знань, є такі: «ЯКЩО опір ізоляції ділянки МОПС зменшується, ТО зменшується і її надійність та виникає можливість виникнення хибних дій» або «ЯКЩО швидкість зменшення опору ізоляції ділянки МОПС не перевищує 10% за одне проходження тестового сигналу, ТО небезпечний дефект не розвивається, але потребує уваги».

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

Системи контролю опору ізоляції ділянок МОПС, що існують на даний час, використовують у своїх розрахунках відомі математичні моделі, однак ці моделі мають досить суттєвий недолік – вони не можуть визначати і враховувати функціональні зв'язки між багатьма з їх контрольованих діагностичних параметрів одночасно, в одній математичній моделі (які, до того ж, часто є різноспрямованими). Задача ускладнюється в умовах неповноти початкових даних, коли частина параметрів невідома на момент розрахунків, наприклад, з причин необхідності проведення додаткових досліджень. Зазначимо, що кількісні методи нездатні забезпечити можливість оперування подібною інформацією. Якщо ж ми перейдемо у площину суто якісних підходів, то втрачимо здатність до оптимізації параметрів моделі на реальних статистичних даних. Ефективним інструментарієм для встановлення зазначених функціональних зв'язків, врахування різної за природою інформації та експертних знань у предметній області, є технологія нейро-нечіткого моделювання.

Зауважимо, що експертні знання можуть формуватись у результаті аналізу контрольованих діагностичних параметрів спеціалістами, які безпосередньо діагностують стан ізоляції ділянок МОПС, задаватись відповідно до літературних джерел чи за даними служби ізоляції і т.ін., що дає можливість

встановлення причин виведення із експлуатації тієї чи іншої ділянки МОПС. Під контрольованим діагностичним параметром розуміємо параметр, відхилення якого від норми сприяло виведенню ділянки МОПС в ремонт. Проаналізувавши літературні джерела [1-3] нами була створена схема (див. рис. 1), яка визначає залежний, або незалежний вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт якості функціонування ділянки МОПС.

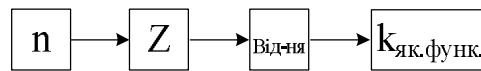


Рис. 1. Структурна схема моделі розрахунку коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС

Підсумовуючи викладене вище, зробимо висновок, що:

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

2. Інформаційні системи підтримки прийняття рішень сприяють зменшенню обсягу робіт по діагностиці ізоляції МОПС, пов'язаних з відключенням МОПС, підвищенню надійності й економічності електропостачання. Із застосуванням таких систем вдається поряд із спрощенням оцінки впливу дефектів упорядкувати рішення проблем, що виникають у життєвому циклі МОПС, які ще не перейшли у категорію непрацездатних.

3. Для підвищення ефективності інформаційної підтримки потрібно застосовувати нові методи подання й обробки необхідної різномірної інформації (кількісних показників, експертних оцінок, нормативних значень тощо).

4. Використання математичного апарату нейро-нечіткого моделювання дозволяє ідентично представляти й обробляти різні види кількісної та якісної, неповної, невизначеної, суперечливої та іншої інформації, забезпечуючи можливість налаштування параметрів математичних моделей на реальних даних.

Перевагами нейро-нечіткого моделювання є оперування нечіткими вхідними даними, зв'язки між якими заздалегідь невідомі, не завжди відома їх точність і правдивість. Основи теорії нечітких множин були закладені професором Каліфорнійського університету Лотфі Заде півсторіччя тому в основоположній статті «Fuzzy Sets» [4]. Концепція нечіткої множини була сформована Заде як відповідь на «незадоволеність математичними методами класичної теорії систем, яка спонукала домагатися штучної точності, невластивої багатьом системам реального світу» [5]. Нечітка логіка надала зручний інструментарій для представлення експертних знань щодо розвитку досліджуваних систем і процесів у математичній формі. Залучення ж до нечітких моделей технології нейронних мереж забезпечує можливість автоматичного налагодження їх параметрів з урахуванням кількісних та якісних факторів та надає низку інших незаперечних переваг для моделювання. Дійсно, включення до моделі поряд із кількісними ще й експертних оцінок низки інформативних якісних чинників та організація механізму логічного висновку дозволяє розраховувати на суттєве підвищення точності прогнозу [6]. Для створення математичної моделі розрахунку коефіцієнту функціонування ділянки МОПС було використано параметри: 1 - кількість відновлень ізоляції після проходження сигналів; 2 - поточний опір ізоляції ділянки МОПС; 3 - опір ізоляції ділянки МОПС після відновлення, по кожному з яких можна робити висновок про стан ділянки МОПС. Але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує стан ділянки МОПС – він лише вказує на певні зміни її технічного стану. Якщо один з цих технічних параметрів виходить за нормовані межі, це зовсім не означає що МОПС повністю втратила свою роботоздатність.

Тому, задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на поточний загальний технічний стан ділянки МОПС та з огляду на прогноз динаміки розвитку пошкоджень, а також їх впливу на загальний технічний стан МОПС.

Застосування для вирішення поставленої задачі методів теорії нечіткої логіки дає нам змогу врахувати значення різних контрольованих параметрів при діагностуванні стану ділянки МОПС і створити базу правил їх взаємодії, не знаючи математичного зв'язку між ними. Для знаходження розв'язку задачі визначення коефіцієнта якості функціонування було вирішено застосувати програмний комплекс MATLAB, оскільки він дозволяє розв'язувати оптимізаційні задачі при вихідних даних, які представлені у вигляді нечітких множин, і враховувати експертну інформацію.

Система комп'ютерної математики MATLAB надала можливість на базі сформованої вибірки навчальних даних отримати аналітичну залежність коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Такий вихід моделі на нечіткій логіці вдається реалізувати, скориставшись методом конструювання нечітких баз знань Тагакі-Сугено [7], причому умовна частина правил в моделі реалізується із застосуванням нечітких множин. Подібна залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування стану ділянки МОПС.

Формування початкових навчальних даних було здійснено наступним чином. Для трьох вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, був визначений коефіцієнт якості функціонування ділянки МОПС. Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB. Повна таблиця містить перебір розглянутих варіантів

сполучень діагностичних параметрів та відповідних ним значень коефіцієнту якості функціонування ділянки МОПС, як показано в таблиці 1. Три вхідних параметри моделі – коефіцієнти, які відповідають трьом контрольованим діагностичним параметрам. Для збільшення точності визначення коефіцієнта якості функціонування можна збільшувати кількість діагностичних параметрів

Таблиця 1

**Результати розрахунків коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС**

Діагностичні параметри			Коефіцієнт якості функціонування ділянки МОПС
$K_n$ , в.о.	$K_z$ , в.о.	$K_{відн}$ , в.о.	
0	0	0	0
1	1	1	1
0	1	1	0
1	0	1	0
...	...	...	...
0,93	0,93	0,93	0,930063
1	1	0,97	0,653953
1	1	0,96	0,644808
1	1	0,87	0,264758
1	1	0,78	0,248279
...	...	...	...
1	1	0,67	0,924798
1	1	0,65	0,927788
1	1	0,56	0,93044
...	...	...	...
0,94	0,94	0,94	0,940054
0,6	0,5	0,8	0,614157
0,2	0,5	0,3	0,446311
0,5	0,3	0,4	0,492952

Математична модель коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС є системою логічних рівнянь в загальному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{відн} \in \text{"нормальне"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{як.функ.}} = a_{11} \cdot k_n + a_{12} \cdot k_z + a_{13} \cdot k_{відн} \\
 \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_z \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_{відн} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{заг.зап.рес}} = a_{21} \cdot k_n + a_{22} \cdot k_z + a_{23} \cdot k_{відн} \\
 \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_{відн} \in \text{"передаварійне"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{заг.зап.рес}} = a_{31} \cdot k_n + a_{32} \cdot k_z + a_{33} \cdot k_{відн} \\
 \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{відн} \in \text{"аварійне"} \text{ ТО} \\
 k_{\text{заг.зап.рес}} = a_{41} \cdot k_n + a_{42} \cdot k_z + a_{43} \cdot k_{відн}
 \end{array} \right.$$

Математична модель коефіцієнта якості функціонування для конкретної ділянки МОПС є системою логічних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{ЯКЩО } k_n \text{ "нормальне"} \text{ ТА } k_z \text{ "нормальне"} \text{ ТА } k_{відн.} \text{ "нормальне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{як.функ.}} = 0,3234k_n + 0,233k_z + 0,03k_{відн.} + 0,098 \\
 \text{ЯКЩО } k_n \text{ "незначне відхилення"} \text{ ТА } k_z \text{ "незначне відхилення"} \text{ ТА } k_{відн.} \text{ "незначне відхилення"} \\
 \text{ТО } k_{\text{як.функ.}} = 0,456k_n + 0,345k_z + 0,133k_{відн.} + 0,094 \\
 \text{ЯКЩО } k_n \text{ "передаварійне"} \text{ ТА } k_z \text{ "передаварійне"} \text{ ТА } k_{відн.} \text{ "передаварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{як.функ.}} = 0,3245k_n + 0,238k_z + 0,235k_{відн.} + 0,097 \\
 \text{ЯКЩО } k_n \text{ "аварійне"} \text{ ТА } k_z \text{ "аварійне"} \text{ ТА } k_{відн.} \text{ "аварійне"} \\
 \text{ТО } k_{\text{як.функ.}} = 0,234k_n + 0,153k_z + 0,343k_{відн.} + 0,093
 \end{array} \right.$$

Далі у рядках цієї таблиці були скореговані значення коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників служби обслуговування МОПС (дані наведені в таблиці 2). Корегування коефіцієнтів якості функціонування для врахування особливостей експлуатації конкретної ділянки МОПС.

Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта якості функціонування

Діагностичні параметри			Коефіцієнт якості функціонування
$K_n$ в.о.	$K_Z$ в.о.	$K_{відн}$ в.о.	
0	0	0	0
1	1	1	1
0	1	1	0
1	0	1	0
...	...	...	...
0,93	0,93	0,93	0,960
1	1	0,97	0,750
1	1	0,96	0,650
1	1	0,87	0,660
1	1	0,78	0,560
...	...	...	...
1	1	0,67	0,909
1	1	0,65	0,850
1	1	0,56	0,820
...	...	...	...
0,94	0,94	0,94	0,940
0,6	0,5	0,8	0,500
0,2	0,5	0,3	0,440
0,5	0,3	0,4	0,445

Відкориговані дані були використані в якості навчальних даних при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою ANFIS редактора з використанням гібридного навчального алгоритму та алгоритму нечіткого висновку Сугено [7] була отримана нейро-нечітка модель коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС (з використанням методу субкластеризації). Структура отриманої нейро-нечіткої мережі показана на рисунку 2.

Для кожної входної змінної нейро-нечіткої моделі використовувались по чотири лінгвістичні терми з Гаусовими функціями належності, що представлені виразом (6) [3]:

$$k_{pec.il} = f(x_{il}; S_{il}; c_{il}) = e^{-\frac{(x_{il}-c_{il})^2}{2S_{il}^2}} \quad (6)$$

де  $S_{il}$  та  $c_{il}$  – числові параметри,  $S_{il}^2$  – в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу, а другий параметр  $c_{il}$  – математичним очікуванням,  $i_l$  – входний фактор нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру,  $x_{il}$  – значення  $i_l$ -го входного фактора моделі:  $x_1=k_n$ ,  $x_2=k_Z$ ,  $x_3=k_{відн}$ .

Для опису стану МОПС, використовуються такі терми, як: «нормальні» значення параметра, «незначні відхилення» значення параметра, «передаварійні» значення параметра, «аварійні» значення параметра.

Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретної ділянки МОПС модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатопшарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження яка містить адаптивні вузли (рис. 2). Призначення шарів цієї мережі.

Шар 1 визначає нечіткі терми діагностичних параметрів. Кожний вузол цього шару є адаптивним з функцією належності  $m_{Ai}(x_i)$  де  $x_i$  – вхід вузла  $i$ .  $A_i$  – лінгвістична нечітка змінна, яка асоціюється з цим вузлом. Так:  $m_{нормальне}$  ( $k_n$ ) – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра кількості відновлень ізоляції після проходження сигналів;  $m_{нормальне}Z$  ( $k_Z$ ) – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{нормальне}відн$  ( $k_{відн}$ ) – величина функції належності для терму «нормальне» значення параметра відновлення опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{незначне відхилення}n$  ( $k_n$ ) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра кількості відновлень ізоляції після проходження сигналів;  $m_{незначне відхилення}Z$  ( $k_Z$ ) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{незначне відхилення}відн$  ( $k_{відн}$ ) – величина функції належності для терму «незначне відхилення» значення параметра відновлення опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{передаварійне}n$  ( $k_n$ ) – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра кількості відновлень ізоляції після проходження сигналів;  $m_{передаварійне}Z$  ( $k_Z$ ) – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{передаварійне}відн$  ( $k_{відн}$ ) – величина функції належності для терму «передаварійне» значення параметра відновлення опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{аварійне}n$  ( $k_n$ ) – величина функції належності для терму

«аварійне» значення параметра кількості відновлень ізоляції після проходження сигналів;  $m_{\text{аварійне}}(k_z)$  – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра опору ізоляції ділянки МОПС,  $m_{\text{аварійне}}(k_{\text{відн}})$  – величина функції належності для терму «аварійне» значення параметра відновлення опору ізоляції ділянки МОПС.

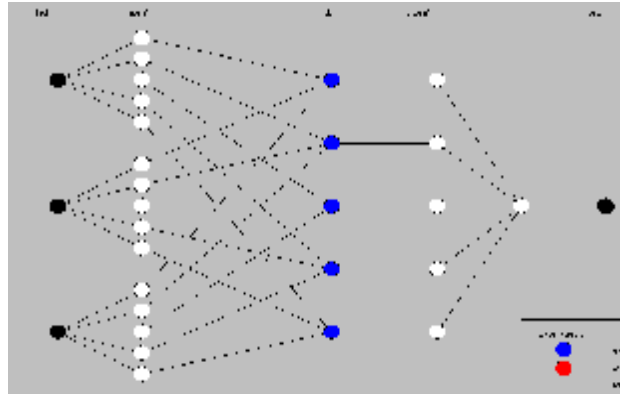


Рис. 2. Структура ANFIS-мережі коефіцієнта якості функціонування

Для знаходження значення коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС використовуємо нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС.

Для визначення значення коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді:

$$\text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА } \dots x_m \in V_i \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (7)$$

де  $A_1, B_2, V_m$  – нечіткі множини посилянь, а  $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – чітка функція висновку,  $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – визначається у вигляді поліному вхідних змінних  $x_1, x_2, \dots, x_m$ .

Математична модель коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС є системою логічних рівнянь (8)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{відн}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{як.функц.}} = a_{11} \cdot k_n + a_{12} \cdot k_z + a_{13} \cdot k_{\text{відн}} \\ \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_z \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } k_{\text{відн}} \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{21} \cdot k_n + a_{22} \cdot k_z + a_{23} \cdot k_{\text{відн}} \\ \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } k_{\text{відн}} \in \text{"передаварійне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{31} \cdot k_n + a_{32} \cdot k_z + a_{33} \cdot k_{\text{відн}} \\ \text{ЯКЩО } k_n \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_z \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{відн}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.зал.рес}} = a_{41} \cdot k_n + a_{42} \cdot k_z + a_{43} \cdot k_{\text{відн}} \end{array} \right. \quad (8)$$

Вихід моделі  $k_{\text{як.функц.}}$  знаходиться як зрівноважена сума висновків (7) бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (8) [8].

$$k_{\text{як.функц.}} = \sum_{j2=1}^{m3} w_{j2} (a_{j21} \cdot k_n + a_{j22} \cdot k_z + a_{j23} \cdot k_{\text{відн}}), \quad (9)$$

де  $0 \leq w_{j2} \leq 1$  – степінь виконання (вага)  $j_2$ -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ділянки МОПС,  $j_2$  – номер правила,  $m_3$  – кількість правил що відображені у  $j_2$ -му правилі (10):

$$w_n = \frac{W_n}{X}, \quad (10)$$

$$\xi = \prod_{j1=1}^{m3} [m_j(k_n) \cdot m_j(k_z) \cdot m_j(k_{\text{відн}})]$$

$$W_n = m_{j''}(k_n) \cdot m_{j''}(k_z) \cdot m_{j''}(k_{\text{відн}})$$

$m_j(k_n), m_j(k_z), m_j(k_{\text{відн}})$  – функції належності значень коефіцієнтів залишкового ресурсу контрольованих діагностичних параметрів до відповідної нечіткої множини значень цих параметрів відповідного правила,  $m_1(k_n) = m_{\text{"нормальне"}}(k_n), m_1(k_z) = m_{\text{"нормальне"}}(k_z), m_1(k_{\text{відн}}) = m_{\text{"нормальне"}}(k_{\text{відн}})$ . Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів Гаусових функцій належності

(середньоквадратичне відхилення  $S_{k_n}$ ,  $S_{k_z}$ ,  $S_{k_{відн}}$  та математичне очікування  $c_{k_n}$ ,  $c_{k_z}$ ,  $c_{k_{відн}}$ ), і параметрів рівнянь висновку. Використовуючи правила навчання параметри вузлів адаптивної нейро-нечіткої багатоварової мережі прямого розповсюдження ANFIS налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між розрахованим виходом моделі  $k_{як.функ.мод.k_3}$  та реальним коефіцієнтом загальнозалишкового ресурсу  $k_{як.функ.}$  (11):

$$d = \sqrt{\frac{1}{N_I} \sum_{k_3=0}^{N_I-1} (k_{як.функ.мод.k_3} - k_{як.функ.k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $N_I$  – кількість рядків у навчальній вибірці,  $k_3$  – номер рядка в навчальній вибірці починаючи з рядка з порядковим номером «0».

Використовується гібридний навчальний алгоритм, кожна епоха якого складається з прямого та зворотного оптимізаційних розрахунків. При прямому розрахунку початкова інформація про значення вектора входу  $k_n$ ,  $k_z$ ,  $k_{відн}$  та виходу  $k_{заг.зал.рес}$  використовується для визначення параметрів висновку методом найменших квадратів. Далі розраховується похибка ANFIS-мережі.

Використовуючи варіантний метод за критерієм мінімізації середньоквадратичної похибки навчання нейро-нечіткої мережі для термів вибрані гаусові функції належності. На основі побудованої нейро-нечіткої мережі проведено експериментальне дослідження адекватності моделювання коефіцієнта якості функціонування для 8 різних ділянок мереж МОПС. За допомогою нейро-нечіткої мережі були сформульовані правила, які дали змогу визначити коефіцієнт якості функціонування по кожній ділянці МОПС. Результати розрахунків наведені в таблиці 3. З наведених у таблиці даних можна зробити висновок, що 1 та 3 ділянка потребують заміни або додаткового діагностування. Ділянки МОПС 2-5, 7 та 8 мають середні значення коефіцієнта якості функціонування, що свідчить про виникнення незначних дефектів, які при правильному обслуговуванні можуть бути усунені на ранніх стадіях розвитку і не переростуть у більш важкі пошкодження, які, як правило, призводять до виникнення аварійних ситуацій, помилкового відключення обладнання тощо.

Таблиця 3

#### Результати моделювання коефіцієнта якості функціонування для 8 різних ділянок мереж МОПС

Порядковий номер ділянки МОПС	$k_z$	$k_n$	$k_{відн}$	$k_{як.функ.}$
1	0,13	0,25	0,23	0,23
2	0,95	0,34	0,28	0,65
3	0,56	0,32	0,68	0,35
4	0,47	0,36	0,78	0,67
5	0,45	0,38	0,88	0,75
6	0,91	0,76	0,91	0,81
7	0,87	0,75	0,75	0,79
8	0,67	0,65	0,74	0,67

Ділянка МОПС під номером 6 має найвищий коефіцієнт якості функціонування, тому вона може експлуатуватись довше і не потребує додаткових затрат на діагностування.

#### Висновки

У даній статті запропонований метод визначення ділянки із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму, який дозволяє попередити розвиток аварійних ситуацій і дає змогу провести завчасну заміну, ремонт, наладку ділянок МОПС.

Розроблений метод визначення коефіцієнта якості функціонування ділянки МОПС базується на використанні методів нейро-нечіткого моделювання та доведений до програмної реалізації в комплексі MATLAB. Перевагою такого методу є можливість залучення для проведення оцінювання досвіду експлуатаційного персоналу, врахування у розрахунках кількісних, якісних, нормативних показників тощо, та забезпечення можливості оптимізації математичної моделі на реальних даних.

#### Література

1. Рубаненко О. Є. Статистичні дослідження закономірностей зміни опорів ізоляції мереж оперативного постійного струму / О. Є. Рубаненко, І. А. Жук, О.О. Рубаненко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2014. – №3 (213). – С.110-114.
2. Жук І.О. Визначенні пошкодженої лінії мереж оперативного постійного струму / І.О. Жук, О. Є. Рубаненко, С.Є. Танкевич // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2013. – №3 (36). – С.5-13.
3. А.с. 1316065 (СССР). Устройство для сигнализации замыканий на землю в двухпроводных сетях постоянного тока/ В.М. Кутин. А.Е. Рубаненко, В.Н. Вишневыский, А.В. Кобылянский // Бюл. изобретений. –

1987. – №21. – С.257.

4. Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка : монографія / А. В. Матвійчук. – К.: КНЕУ, 2011. – 439 с.

5. Матвійчук А. В. Аналіз та прогнозування розвитку фінансово-економічних систем із використанням теорії нечіткої логіки: монографія / А. В. Матвійчук. – К.: Центр навч. літератури, 2005. – 208 с.

6. Применение нечёткой нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом для оценки состояния электрооборудования / О. Н. Агамалов, Н. В. Костерев, Н. П. Лукаш и [др.] // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 2. – С. 49–58.

7. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – № 3. – P. 338–353.

8. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 167 с.

9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116–132.

10. Костерев Н.В. Нечёткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования / Н.В. Костерев, Е.И. Бардик., Р.В. Вожаков, Т.Ю. Курач // Наукові праці ДонНТУ. Електротехніка і енергетика. – 2008. – №8. – С. 65–70.

#### References

1. Rubanenko O. E. Statystychni doslidzhennya zakonmirnostey zminy oporu izolyatsiyi merezh operatyvnoho postyynoho strumu / O. E. Rubanenko, I. A. Zhuk, O.O. Rubanenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – 2001. – № 3 (213). – P. 110-114.

2. Zhuk I.O. Vyznachenni poshkodzhenoї liniyi merezh operatyvnoho pstyynoho strumu / O. E. Rubanenko, S.E. Tankevych // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny. – 2013. – № 3 (36). – P.5-13.

3. A.s. 1316065 (SSSR). Ustroystvo dlya syhnalizatsyyi zamykanyu na zemlyu v dvukhprovodnykh setyakh postoyannoho toka/ V.M. Kutyn. A.E. Rubanenko, V.N. Vyshnevskyy, A.V. Kobyl'yansky // Byul. yzobr. – 1987. – №21. – P.257.

4. Matviychuk A. V. Shtuchnyy intelekt v ekonomitsi: neyronni merezhi, nechitka lohika : monohrafiya / A. V. Matviychuk. – K.: KNEU, 2011. – 439 p.

5. Matviychuk A. V. Analiz ta prohnozuvannya rozvytku finansovo-ekonomichnykh system iz vykorystannyam teoriyi nechitkoyi lohiky: monohrafiya / A. V. Matviychuk. – K.: Tsentr navch. lit., 2005. – 208 p.

6. Prymenenye nechëtkoї nelyneynoї avtorehryssonnoї modely s vneshnym vkhodom dlya otsenky sostoyannya elektrooborudovanyya / O. N. Ahamalov, N. V. Kosterev, N. P. Lukash y dr.] // Tekhnichna elektrodynamika. – 2004. – № 2. – P. 49–58.

7. Zadeh L. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – № 3. – P. 338–353.

8. Zade L. Ponyatyie lynhvystycheskoy peremennoy v pryomenenye k prynyatyuu pryblyzhennikh reshenyy: Per. s anhl. – M.: Myr, 1976. – 167 p.

9. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116–132.

10. Kosterev N.V. Nechëtkiye alhorytmy otsenky tekhnicheskoho sostoyannya y prohnozyrovannya ostatochnoho resursa elektrooborudovanyya / Kosterev N.V., Bardyk E.Y., Vozhakov R.V., Kurach T.E.// Naukovi pratsi DonNTU – Elektrotekhnik i enerhetyka. – 2008. – №8. – P. 65–70.

Рецензія/Peer review : 27.5.2015 р.

Надрукована/Printed :15.5.2015 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією