



УДК 621.317.3

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-3-15

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ В УМОВАХ  
НЕПОВНОТИ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ**

**Рубаненко Олександр Євгенійович**, к.т.н., професор  
**Токарчук Олексій Анатолійович**, к.т.н., доцент  
Вінницький національний аграрний університет

**Oleksandr Rubanenko**, Ph.D., Professor  
**Oleksii Tokarchuk**, Ph.D., Associate Professor  
Vinnytsia National Agrarian University

*В статті проаналізовано пошкоджуваність електричних двигунів на агропереробних підприємствах України. З метою автоматизації процесу визначення технічного стану електричних двигунів впроваджуються сучасні мікропроцесорні системи. Їх програмне забезпечення реалізує складні та інформативні алгоритми визначення поточного стану електричних двигунів на основі аналізу поточних значень діагностичних параметрів.*

*Однак, поточні значення не всіх діагностичних параметрів електричних двигунів відомі на момент визначення технічного стану. Тому застосовуються їх прогнозні значення.*

*Авторами запропоновано оцінювати поточний технічний стан електричних двигунів, аналізуючи значення коефіцієнта його залишкового ресурсу. Значення цього коефіцієнта змінюються від 1 в.о. (двигун справний) до 0 в.о. (двигун несправний). На прикладі показано застосування програмного забезпечення, а саме, Anfis редактор додатку Fuzzy Logic Tool Box пакету прикладних програм Matlab для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу електродвигуна. Зазначається, що похибка навчання моделі, яка ґрунтується на 582 розглянутих варіантах сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значеннях залишкового ресурсу електродвигуна, не перевищує 0,00288 в.о. (0,2%), а на тестовій виборці 0,05904 (4,1%).*

*Враховуючи велику кількість взаємно впливових діагностичних параметрів електродвигунів, з метою спрощення оцінювання поточного технічного стану, пропонуємо використовувати інтегральний діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу.*

*Водночас, складно визначити технічний стан працюючого електродвигуна, адже деякі діагностичні параметри можна вимірювати у відключеного або розібраного електродвигуна (наприклад, вимірювання опору ізоляції обмотки статора мегаомметром або вимірювання діаметра валу ротора під підшипником з метою виявлення причини вібрації). Тому визначений в темпі процесу за таких умов, технічний стан працюючого електродвигуна є прогнозованим – нечітким. Для його визначення варто використовувати методи та засоби нейро-нечіткого моделювання.*

*Тому проблема підвищення якості експлуатації електродвигунів на агропромисловому виробництві шляхом покращення якості їх діагностування актуальна і має велике народногосподарське значення.*

**Ключові слова:** електричний двигун, технічний стан, діагностування, пошкодження, статор, ротор, нейро-нечітке моделювання, коефіцієнт залишкового ресурсу, функція належності.

**Ф. 11. Рис. 11. Табл. 5. Лит. 15.**

**1. Постановка проблеми**

Україна – промислово-аграрна країна з переважанням продукування сировини. Вона є одним із провідних експортерів деяких видів сільськогосподарської продукції та продовольства, «житницею Європи». Агропромисловий комплекс (АПК) є вагомим складовою частиною економіки України. Серед інших задач цей комплекс займається виробництвом та переробкою сільськогосподарської продукції [1].

Україна є не лише виробником та постачальником сільськогосподарської сировини, а і сучасної високо технологічної продукції підприємств АПК. Рисою цих підприємств є постійне технічне переозброєння, яке полягає у заміні застарілого, малоефективного обладнання на більш якісне і надійне, що відповідає сучасним вимогам. Це дозволяє покращити надійність та якість виробництва, зменшити собівартість продукції.

З метою автоматизації виробництва на таких підприємствах широко застосовуються



електродвигуни (ЕД) різної потужності, наприклад, асинхронні ЕД напругою 380 В з коротко замкнутим ротором. Таких електродвигунів понад 95%.

На ефективність роботи підприємств АПК впливає технічний стан електричних двигунів та надійність їх експлуатації.

Нажаль експлуатаційна надійність ЕД ще залишається недостатньою. Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу держави суттєвою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та виробленої ними продукції на зовнішньому ринку є високий рівень витрат електричної енергії на виробництво сільськогосподарської продукції [1]. Тому все більше уваги приділяється альтернативним джерелам електроенергії: сонячним електростанціям, малим гідроелектростанціям, вітровим електростанціям [3]. Також мають місце втрати сировини під час переробки сільськогосподарської продукції, викликані пошкодженням обладнання [4]. До такого обладнання можна віднести і електричні двигуни (ЕД).

Аналіз причин відмов електродвигунів свідчить про те, що, незважаючи на важкі умови роботи в сільському господарстві, переважну більшість з них можна було зберегти: при якісному діагностуванні; при вчасному виведенні в ремонт; за умови посприятливих умов експлуатації ЕД, що мають дефекти на ранній стадії розвитку; за рахунок впровадження on-line систем визначення поточного стану ЕД; при фіксації дефектів на ранній стадії їх розвитку. Також, сучасні методи та засоби діагностування [10] дозволяють обґрунтовано замінити, або вивести в ремонт ЕД, з врахуванням вимог та можливостей технологічного процесу на агропереробному підприємстві.

## 2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Пошкоджуваність досліджуваних електродвигунів зумовлена такими особливостями їх експлуатації, як: помилки у виборі ЕД на стадії проектування або під час експлуатації (після заміни ЕД, після перемотування обмотки та зменшення коефіцієнта корисної дії), низький рівень обслуговування та ремонтів (викликаний недостатньою кількістю та кваліфікацією персоналу, відсутністю сучасного ремонтного обладнання), несприятливі умови оточуючого середовища (занадто висока або низька температура, висока вологість, великі коливання температури і т.п.), тяжкі режими експлуатації (механічні перевантаження, нерівномірний графік навантаження, часті пуски), понад нормовані показники якості електроенергії (перенапруги, надструми, низькі напруги, несинусоїдність, несиметрія), низька надійність внутрішньогосподарських та розподільчих сільських електромереж [2].

Для кращого розуміння алгоритму діагностування введемо інтегральні діагностичні параметри (ДН), показані в табл. 1 і рис. 1.

Таблиця 1

Спрощена таблиця пошкоджень ЕД

Вузол	Діагностичний параметр – коефіцієнт залишкового ресурсу	Кількість виведених з експлуатації ЕД	
		одиниць	%
Обмотка статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу обмотки статора, $\kappa_1$	57	31
Сталь статора	Коефіцієнт залишкового ресурсу сталі статора, $\kappa_2$	7	4
Підшипники	Коефіцієнт залишкового ресурсу підшипників, $\kappa_3$	49	27
Ротор	Коефіцієнт залишкового ресурсу ротора, $\kappa_4$	21	12
Охолодження	Коефіцієнт залишкового ресурсу системи охолодження, $\kappa_5$	19	11
Брно	Коефіцієнт залишкового ресурсу брно, $\kappa_6$	29	15
Разом		172	100

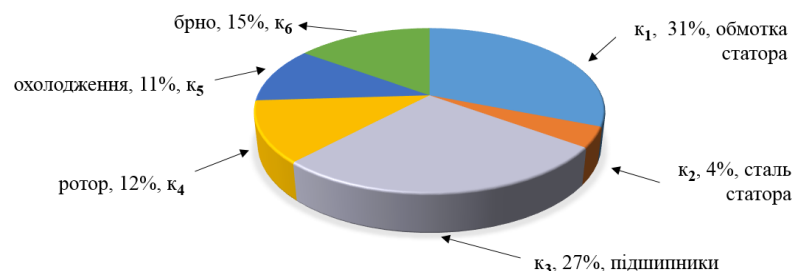


Рис. 1. Діаграма пошкоджень ЕД



### 3. Мета та завдання дослідження

Мета досліджень полягає у підвищенні якості визначення поточного технічного стану в умовах не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів електричних двигунів на їх технічний стан і в якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень ЕД.

Під час досліджень розв'язувались наступні задачі:

- аналіз пошкоджень ЕД на підприємствах АПК;
- розробка методу визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних.

### 4. Виклад основного матеріалу

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ЕД, 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 (1) і тому характеризують сумарне напрацювання ЕД від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення, тобто характеризують залишковий технічний ресурс. Коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_i$  за  $i$ -м діагностичним параметром:

$$k_{i1} = \frac{x_{i1,гран} - x_{i1,ном}}{x_{i1,гран} - x_{i1,поч}}, \quad (1)$$

де  $x_{i1,гран}$  – граничне нормативне значення  $i_1$ -го діагностичного параметра,  $x_{i1,ном}$  – 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 асинхронного електричного двигуна (ЕД) на клас напруги 380 В параметр  $R$  активного опору ізоляції ЕД на час введення ЕД в експлуатацію дорівнював 18 МОм, а на час поточного контролю дорівнював 18 МОм, граничне значення цього параметра – 0,5 МОм. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_1$  за діагностичним параметром  $R$  визначається за виразом (2):

$$k_1 = \frac{0,5 \text{ МОм} - 18 \text{ МОм}}{0,5 \text{ МОм} - 112 \text{ МОм}} = 0,16 (\text{в.о.}). \quad (2)$$

Враховуючи те, що пошкодження кожного з вузлів ЕД (зазначених в табл. 4) призводить до пошкодження ЕД, то коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом (3) [7]:

$$K_{рес} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (3)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ЕД по  $\tau$ -му діагностичному параметру,  $\tau$  –  $\tau$ -тий діагностичний параметр,  $\nu$  – кількість діагностичних параметрів відповідно до кількості вузлів,  $p_{\tau}$  – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра (4):

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (4)$$

де  $y_{\tau}$  – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю  $\tau$ -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.

Відповідно до виразу (3), коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД визначається за виразом (5):

$$K_{заг.рес} = K_1^{p_{k1}} \cdot K_2^{p_{k2}} \cdot \left\{ 1 - \left[ \begin{aligned} &(1-k_3) \cdot p_{k3} + \\ &+(1-k_4) \cdot p_{k4} + (1-k_{p2}) \cdot p_{k5} \end{aligned} \right] \right\}^{p_{k3} + p_{k4} + p_{k5} + p_{k6}}, \quad (5)$$

де  $K_1, K_{k2}, K_{k3}, K_4, K_5, K_6$  – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах  $R, t_{ст}, \Delta I$  – визначають коефіцієнт залишкового ресурсу обмоток статора  $k_1$ ,  $t_{ст}$  – визначають коефіцієнт залишкового ресурсу сталі статора  $k_2$ ,  $t_k, s_p$  – визначають коефіцієнт



залишкового ресурсу ротора  $k_3$ ,  $s_n$ ,  $s_k$  – визначають коефіцієнт залишкового ресурсу підшипників  $k_4$ ,  $s_T$ , – визначають коефіцієнт залишкового ресурсу системи охолодження  $k_5$ ,  $t_6$  – визначають коефіцієнт залишкового ресурсу брно  $k_6$ ;  $p_{k1}$ ,  $p_{k2}$ ,  $p_{k3}$ ,  $p_{k4}$ ,  $p_{k5}$ ,  $p_{k6}$  – ймовірності пошкоджень деталей ЕД, виявлених шляхом контролю діагностичних параметрів з урахуванням загальної кількості пошкоджень (обмоток та сталі статора).

Так, відповідно до табл. 1:  $p_{k1}=0,31$  в.о.,  $p_{k2}=0,04$  в.о.,  $p_{k3}=0,27$  в.о.,  $p_{k4}=0,12$  в.о.,  $p_{k5}=0,11$  в.о.,  $p_{k6}=0,15$  в.о.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД було використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ЕД. Але жоден з даних параметрів не в повній мірі характеризує технічний стан уводу, він лише вказує на певні зміни технічного стану ЕД.

На даному етапі розвитку сучасного комп'ютерного забезпечення використання для вирішення поставленої задачі методів теорії нечітких множин є не складним завданням [11]. Це дає змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ЕД і створити базу правил їх взаємодії, не знаючи математичного зв'язку між ними. За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД, використовуючи яку відредагувати раніше створену вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від діагностичних параметрів у вигляді поліному. Ця залежність може бути використана у програмному забезпеченні сучасних мікропроцесорних пристроїв діагностування ЕД. Формування початкових навчальних даних було проведено таким чином.

Для шести (до спрощення – для десяти) вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД (за виразом 1). Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми.

Шість вхідних параметрів моделі – коефіцієнти залишкового ресурсу деталей та вузлів ЕД, які залежать від поточних значень десяти діагностичних параметрів. Кількість параметрів може бути більшою. Фрагмент результатів розрахунків наведено в табл. 2.

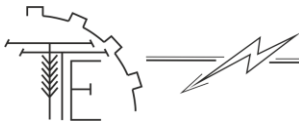
Таблиця 2

Фрагмент результатів розрахунків коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД

$K_1$	$K_{k2}$	$K_{k3}$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_{рес\ ЕД}$
в.о.						
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
...	...	...	...	...	...	...
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
...	...	...	...	...	...	...
1.00	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.27
1.00	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.26
...	...	...	...	...	...	...
1.00	1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09
1.00	1.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07
1.00	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04
...	...	...	...	...	...	...

Під час розрахунків варто враховувати те, що аварійне зменшення опору ізоляції, аварійне зростання струму статора, понад нормоване зростання температури обмоток статора призводять до спрацювання струмового або температурного захистів та до відключення ЕД. Отже нульове значення коефіцієнта залишкового ресурсу по будь-якому з цих діагностичних параметрів зменшує до нуля значення загального залишкового ресурсу ЕД.

Повна таблиця містить 582 (рис. 2) розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів



та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ЕД.

Водночас зменшення значень коефіцієнтів залишкових ресурсів ЕД по діагностичних параметрах: віброзсув корпусу ЕД, перекис фазних струмів статора, зростання температури корпусу ЕД, віброзсув ротора, віброзсув підшипників, віброзсув турбіни охолодження, температура брно хоча і зменшує значення загального залишкового ресурсу ЕД, однак не викликає швидкого відключення ЕД.

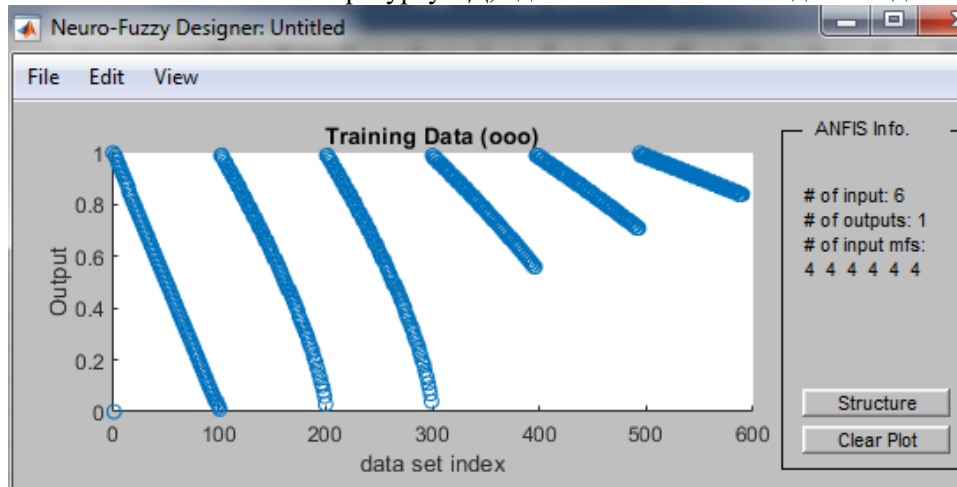


Рис. 2. Завантаження даних в ANFIS редакторі MATLAB

Далі у 83 рядках цієї таблиці було змінено значення коефіцієнту залишкового ресурсу електродвигуна (табл. 3) шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників відділів головного енергетика підприємств АПК, та інших організацій.

Відкориговані дані були використані як навчальні дані при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor (Edit – редактор, Adaptive Network of Fuzzy Inference of the System – адаптивна мережа системи нечіткого висновку) з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД (з використанням методу субкластеризації).

Таблиця 3

Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД

$K_1$	$K_{K2}$	$K_{K3}$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_{рес\ ЕД}$
в.о.						
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
...	...	...	...	...	...	...
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.1
0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.1
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.1
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.1
...	...	...	...	...	...	...
1.00	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.2
1.00	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.2
...	...	...	...	...	...	...
1.00	1.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.2
1.00	1.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.2
1.00	1.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.2
...	...	...	...	...	...	...





Структура отриманої нейро-мережі показана на рис. 3.

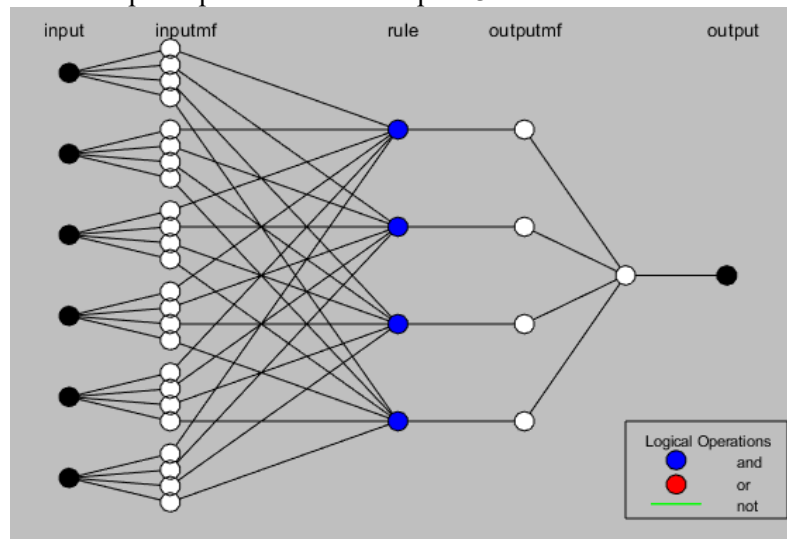


Рис. 3. Структура отриманої нейро-мережі

Для кожної вхідної змінної нейро-моделі використовувались по чотири лінгвістичних терми з гаусовими функціями належності (рис. 4) вираз (6) [14]:

$$\kappa_{pec.i1} = f(x_{i1}; \sigma_{i1}; c_{i1}) = e^{-\frac{(x_{i1} - c_{i1})^2}{2 \cdot \sigma_{i1}^2}} \quad (6)$$

У виразі (6):  $\sigma_{i1}$  та  $c_{i1}$  – числові параметри,  $\sigma_{i1}^2$  в теорії ймовірності називається дисперсією розподілу [14], а другий параметр  $c_{i1}$  – математичним сподіванням,  $i1$  – вхідний параметр нейро-нечіткої моделі, який відповідає діагностичному параметру,  $x_{i1}$  – значення  $i1$ -го вхідного параметра моделі:  $x_1 = \kappa_1, x_2 = \kappa_2, x_3 = \kappa_3, x_4 = \kappa_4, x_5 = \kappa_5, x_6 = \kappa_6$ .

Це такі терми, як: «нормальні» (стан ЕД – справний) значення діагностичного параметра – коефіцієнта його залишкового ресурсу (КЗР). Значення цих коефіцієнтів змінюються від 1 в.о. (двигун справний) до 0 в.о. (двигун несправний). Значення КЗР згруповані в множини: нормальні значення діагностичних параметрів (КЗР  $\in 1..0,76$ ), стан ЕД з незначними відхиленнями діагностичних параметрів (КЗР  $\in 0,75..0,51$ ), передаварійний (КЗР  $\in 0,5..0,26$ ) – з передаварійними відхиленнями діагностичних параметрів, аварійний (КЗР  $\in 0,26..0$ ) – з аварійними відхиленнями діагностичних параметрів. Для знаходження значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу використовуємо нечітку нелінійну авторегресійну модель коефіцієнта загально залишкового ресурсу ЕД. Ця модель встановлює нечітке нелінійне перетворення між значеннями коефіцієнтів залишкового ресурсу по діагностичних параметрах та загальним коефіцієнтом залишкового ресурсу ЕД (7).

$$\kappa_{pec.ED} = F(\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5, \kappa_6) \quad (7)$$

де  $F$  – нечітке функціональне перетворення.

Математична модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу є системою логічних рівнянь (8)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТО } \kappa_{pec.ED} = a_{11} \cdot \kappa_1 + a_{12} \cdot \kappa_2 + a_{13} \cdot \kappa_3 + a_{14} \cdot \kappa_4 + a_{15} \cdot \kappa_5 + a_{16} \cdot \kappa_6 \\ \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"нормальне"} \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\ \text{ТО } \kappa_{pec.ED} = a_{21} \cdot \kappa_1 + a_{22} \cdot \kappa_2 + a_{23} \cdot \kappa_3 + a_{24} \cdot \kappa_4 + a_{25} \cdot \kappa_5 + a_{26} \cdot \kappa_6 \\ \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"передаварійне"} \\ \text{ТО } \kappa_{pec.ED} = a_{31} \cdot \kappa_1 + a_{32} \cdot \kappa_2 + a_{33} \cdot \kappa_3 + a_{34} \cdot \kappa_4 + a_{35} \cdot \kappa_5 + a_{36} \cdot \kappa_6 \\ \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_2 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"аварійне"} \text{ТА } \kappa_6 \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТО } \kappa_{pec.ED} = a_{41} \cdot \kappa_1 + a_{42} \cdot \kappa_2 + a_{43} \cdot \kappa_3 + a_{44} \cdot \kappa_4 + a_{45} \cdot \kappa_5 + a_{46} \cdot \kappa_6 \\ \dots \end{array} \right. \quad (8)$$



Вихід моделі  $k_{заг.зал.рес.}$  знаходиться як зрівноважена сума висновків (9) бази правил, записаних у вигляді системи логічних рівнянь (8).

$$K_{рес. ЕД} = \sum_{j_2=1}^{m_3} w_{j_2} \left( \begin{matrix} a_{j_2 1} \cdot K_1 + a_{j_2 2} \cdot K_2 + a_{j_2 3} \cdot K_3 + a_{j_2 4} \cdot K_4 \\ + a_{j_2 5} \cdot K_5 + a_{j_2 6} \cdot K_6 + c_{j_2} \end{matrix} \right), \quad (9)$$

де  $0 \leq w_{j_2} \leq 1$  – ступінь виконання (вага)  $j_2$ -го правила, яка визначається відповідністю реальних змін діагностичних параметрів ЕД, що відображені у  $j_2$ -му правилі.

Налаштування моделі полягає у визначенні параметрів функцій належності і рівнянь висновку. Терми значень лінгвістичних змінних задаються у вигляді гаусових функції належності. Необхідно визначити середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{K_1}, \sigma_{K_2}, \sigma_{K_3}, \sigma_{K_4}, \sigma_{K_5}, \sigma_{K_6}$  та математичне очікування  $c_{K_1}, c_{K_2}, c_{K_3}, c_{K_4}$ , гаусових функції належності, параметри рівнянь висновку ( $a_{1 1} - a_{4 4}, c_1 - c_4$ ). Для полегшення налаштування та адаптації структури розробленої моделі до реальних параметрів конкретного ЕД модель реалізується у вигляді адаптивної нейронечіткої багатопарової мережі прямого розповсюдження ANFIS. ANFIS являє собою найпростішу мережу прямого розповсюдження, яка містить адаптивні вузли, використовуючи правила навчання параметри цих вузлів налаштовуються так, щоб мінімізувати похибку між реальним виходом моделі  $K_{рес.ЕД}$  та реальним коефіцієнтом загального залишкового ресурсу  $K_{рес.ЕД}$ . ЕД (10) [14]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N_1} \sum_{k_3=0}^{N_1-1} (k_{рес.ЕД k_3} - k_{заг.ЕД k_3})^2} \rightarrow \min, \quad (10)$$

де  $N_1$  – 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. Модель загального коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД реалізована у вигляді ANFIS-мережі з використанням прикладних програм Fuzzy Logic Toolbox системи MathLab.

З метою зменшення часу на навчання нейро-нечіткої моделі в системі комп'ютерної математики MATLAB [7–15] використовуємо метод субкластеризації. Субкластеризація – це об'єднання об'єктів у групи на основі однаковості ознак для об'єктів однієї групи та неоднаковості ознак між групами. Більшість алгоритмів кластеризації не ґрунтуються на традиційних для статистичних методів припущеннях. Вони можуть використовуватись в умовах майже повної відсутності інформації про закони розподілу даних. Кластеризацію використовують для об'єктів з кількісними (числовими), якісними або змішаними ознаками.

Початковою інформацією для кластеризації є матриця спостережень, кожен рядок якої являє собою значення  $n$  ознак одного з  $M$  кластерів. Задача кластеризації полягає в розбитті об'єктів на декілька підмножин (кластерів), в яких об'єкти більш схожі між собою, ніж з об'єктами з інших кластерів. В матричному просторі «однаковість» зазвичай визначають через відстань. Відстань може розраховуватись як між початковими об'єктами (рядками матриці), так і від цих об'єктів до прототипу кластерів.

Зазвичай координати прототипів не відомі і вони знаходяться одночасно з розбиттям даних на кластери. Використовувались такі параметри методу кластеризації: рівень впливу вхідних змінних (Range of influence) – 0,99; коефіцієнт послаблення (Squash factor) – 1,25; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів потенціал даної точки має бути вищим за потенціал центра першого кластера для того, щоб центром одного з кластерів була призначена точка, яка розглядається (Accept radio) – 0,5; коефіцієнт, який встановлює, у скільки разів потенціал даної точки має бути меншим за потенціал центра першого кластера, щоб ця точка була виключена з можливих центрів кластерів (Reject radio) – 0,15.

Тому, наприклад, при подальшому моделюванні для коефіцієнта залишкового ресурсу  $K_{рес.ЕД}$  діагностичного параметра  $K_1$  першого правила значення гаусової функції належності було взято такі значення параметрів:  $\delta_{k_1} = 0,3650$  в.о.,  $c_{k_1} = 0,9951$  в.о.

Відповідно до виразу (9) було введено такі параметри рівнянь висновків правил (табл.4).

Таблиця 4

Параметри висновків правил нейро-нечіткої моделі ЕД

Номер правила, $j_2$	Параметри рівняння висновку						
	$a_{j_2,1}$	$a_{j_2,2}$	$a_{j_2,3}$	$a_{j_2,4}$	$a_{j_2,5}$	$a_{j_2,6}$	$c_{j_2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.33820	-0.00321	0.02888	0.12670	0.12570	0.12670	-0.02239
2	0.12920	0.03312	0.37440	-0.20570	0.23000	0.44720	-0.00150
3	0.1246	0.3107	0.5195	-0.2654	0.1413	0.1772	-0.0018
4	-0.0750	-0.0154	0.4040	0.3480	0.3180	0.0436	-0.00541



Для навчання мережі використовувався гібридний алгоритм навчання. Після тридцяти епох навчання середньоквадратична похибка навчання склала 0,00288 в.о. (на тестовій виборці 0,041 в.о.). В результаті навчання були отримані параметри гаусових функцій належності, які в подальшому були використані при створенні нейро-нечіткої моделі ЕД.

З урахуванням проведених ітераційних обчислювальних експериментів визначено вектор параметрів функцій належності (табл. 5).

Таблиця 5.

Параметри функцій належності

Вхідні параметри моделі	Назва терму (нечіткої множини значень вхідних параметрів)	Номер правила	Параметри функцій належності	
			$\delta$	$C$
1	2	3	4	5
K <sub>1</sub>	нормальні	1(2)	0,2684	1,0350
	незначні відхилення	2(1)	0,3650	0,9951
	передаварійні	3(3)	0,3820	0,9852
	аварійні	4(4)	0,2475	0,2018
K <sub>2</sub>	нормальні	1(1)	0,3620	0,9911
	незначні відхилення	2(3)	0,4017	0,9738
	передаварійні	3(2)	0,3646	0,4656
	аварійні	4(4)	0,4138	0,2728
K <sub>3</sub>	нормальні	1(3)	0,3354	0,9895
	незначні відхилення	2(1)	0,3947	0,9843
	передаварійні	3(2)	0,3625	0,4792
	аварійні	4(4)	0,3969	0,2531
K <sub>4</sub>	нормальні	1(3)	0,3262	0,9918
	незначні відхилення	2(1)	0,3814	0,7889
	передаварійні	3(2)	0,3585	0,4788
	аварійні	4(4)	0,3923	0,2504
K <sub>5</sub>	Нормальні	1(1)	0,3851	0,7823
	незначні відхилення	2(2)	0,3639	0,4789
	передаварійні	3(3)	0,3814	0,2521
	аварійні	4(4)	0,3923	0,2503
K <sub>6</sub>	нормальні	1(1)	0,3841	0,7838
	незначні відхилення	2(2)	0,3616	0,4773
	передаварійні	3(3)	0,3822	0,2521
	аварійні	4(4)	0,3923	0,2503

З урахуванням даних таблиці 4 і 5, можна отримати математичну модель коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД для розглянутого прикладу. На рис. 5 показано фрагмент віконної заставки редактора адаптивної мережі системи нечіткого висновку (ANFIS Editor) пакету Fuzzy Logic Toolbox системи комп'ютерної математики MATLAB. Ця мережа має шість входів, один вихід та передбачає використання алгоритму нечіткого висновку Сугено.

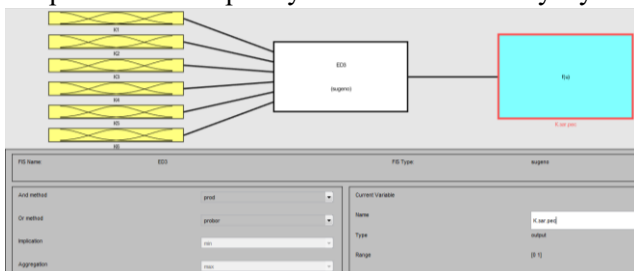


Рис. 4. Фрагмент віконної заставки редактора ANFIS

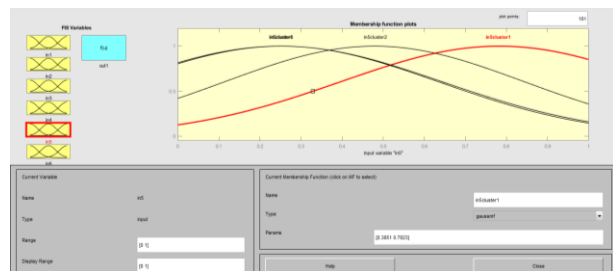


Рис. 5. Параметри функцій належності





З рис. 4, 5 видно, що під час формування структури нейро-нечіткої моделі ЕД було задано шість входів та один вихід цієї моделі. Кожен з шести входів має по чотири терми. Тобто кожна множина можливих значень вхідних параметрів моделі умовно поділена на чотири підмножини: «нормальні» значення вхідного параметра, «незначні відхилення» значення вхідного параметра, «передаварійні» значення вхідного параметра, «аварійні» значення вхідного параметра.

Ступінь належності кожного значення вхідного параметра до відповідної цьому параметру множини значень визначається гаусовою функцією належності. Модель призначена для знаходження числового значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД, тому має один вихід. Це числове значення знаходиться шляхом розв'язування лінійного рівняння, яке описує залежність коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД від вхідних (діагностичних) параметрів.

На рис. 6 показано: діапазон можливих значень коефіцієнта загального залишкового ресурсу електродвигуна  $\kappa_{\text{рес ЕД}} = 0 \div 1$  в.о.

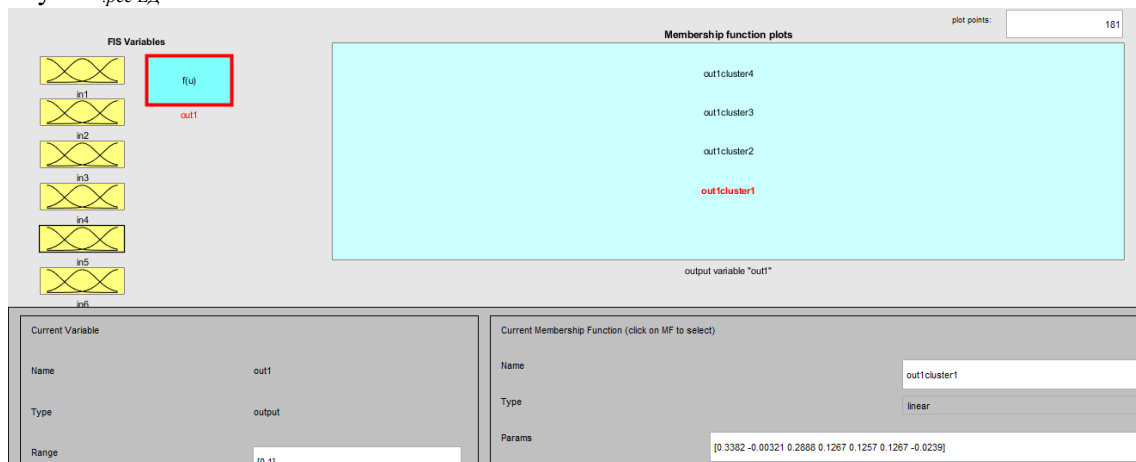


Рис. 6. Виведення параметрів рівняння висновку правила

Отримана нейро-нечітка модель (11).

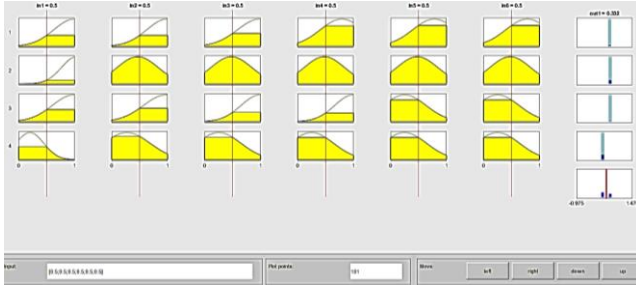
$$\begin{aligned}
 & \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } \kappa_2 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } \kappa_3 \in \text{"нормальне"} \\
 & \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } \kappa_5 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } \kappa_6 \in \text{"нормальне"} \\
 & \text{ТО } \kappa_{\text{рес ЕД}} = 0,33820 \cdot \kappa_1 - 0,00321 \cdot \kappa_2 + 0,02888 \cdot \kappa_3 + 0,12670 \cdot \kappa_4 + \\
 & + 0,12570 \cdot \kappa_5 + 0,12670 \cdot \kappa_6 - 0,02239; \\
 & \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } \kappa_2 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \text{ТА } \kappa_3 \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } \kappa_4 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \text{ТА } \kappa_5 \in \text{"незначне відхилення"} \text{ ТА } \kappa_6 \in \text{"незначне відхилення"} \\
 & \text{ТО } \kappa_{\text{рес ЕД}} = 0,12920 \cdot \kappa_1 + 0,03312 \cdot \kappa_2 + 0,37440 \cdot \kappa_3 - 0,20570 \cdot \kappa_4 + \\
 & + 0,23000 \cdot \kappa_5 + 0,44720 \cdot \kappa_6 - 0,00150; \\
 & \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } \kappa_2 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } \kappa_3 \in \text{"передаварійне"} \\
 & \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } \kappa_5 \in \text{"передаварійне"} \text{ ТА } \kappa_6 \in \text{"передаварійне"} \\
 & \text{ТО } \kappa_{\text{рес ЕД}} = 0,1246 \cdot \kappa_1 + 0,3107 \cdot \kappa_2 + 0,5195 \cdot \kappa_3 - 0,2654 \cdot \kappa_4 + 0,1413 \cdot \kappa_5 + \\
 & + 0,1772 \cdot \kappa_6 - 0,0018; \\
 & \text{ЯКЩО } \kappa_1 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } \kappa_2 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } \kappa_3 \in \text{"аварійне"} \\
 & \text{ТА } \kappa_4 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } \kappa_5 \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } \kappa_6 \in \text{"аварійне"} \\
 & \text{ТО } \kappa_{\text{рес ЕД}} = -0,0750 \cdot \kappa_1 - 0,0154 \cdot \kappa_2 + 0,4040 \cdot \kappa_3 + 0,3480 \cdot \kappa_4 + 0,3180 \cdot \kappa_5 + \\
 & + 0,0436 \cdot \kappa_6 - 0,0054.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Вона дозволяє визначити значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу ЕД залежно від значень вхідних параметрів – коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному з контрольованих діагностичних параметрів.

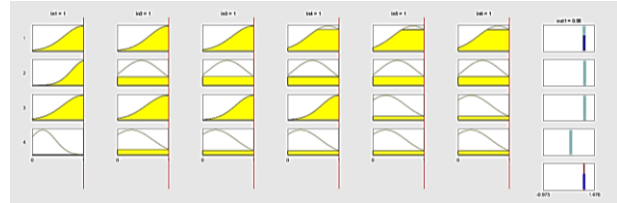
Так, якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде



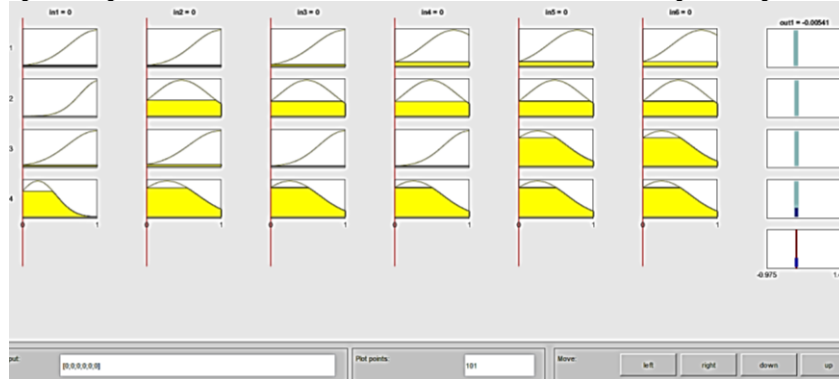
дорівнювати 0,5 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД дорівнює 0,332 в.о. (рис. 7), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 1 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД (з похибкою 2%) дорівнює 0,98 в.о. (рис. 8), якщо кожен з коефіцієнтів залишкового ресурсу діагностичних параметрів буде дорівнювати 0 в.о., то коефіцієнт загального залишкового ресурсу ЕД (з похибкою 0,5%) дорівнює 0 в.о. (рис. 9).



**Рис. 7.** Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 0.5 в.о

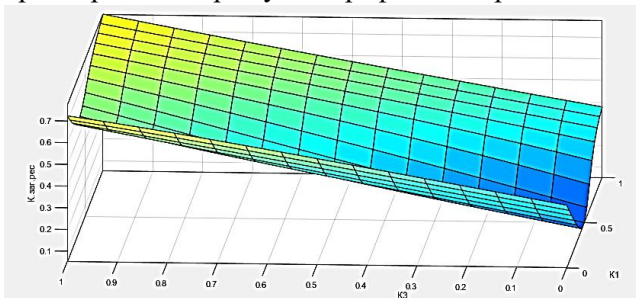


**Рис. 8.** Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 1 в.о

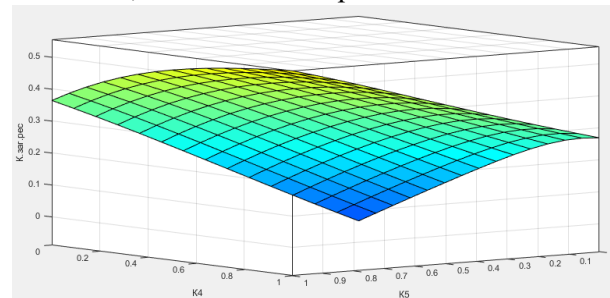


**Рис. 9.** Визначення коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД при значеннях всіх вхідних параметрів 0 в.о

Складність залежностей вихідного параметра розробленої моделі від сукупності вхідних параметрів підтверджують графіки поверхонь цих залежностей, які показані на рис. 10 - 11.



**Рис. 10.** Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від  $k_1$  та  $k_3$ .



**Рис. 11.** Залежність коефіцієнта залишкового ресурсу ЕД від  $k_4$  та  $k_5$ .

Отже, пропонуємо метод визначення технічного стану ЕД в умовах неповноти початкових даних, який шляхом використання нейро нечіткого моделювання дозволяє отримати поточне значення коефіцієнту залишкового ресурсу ЕД і в залежності від результату зробити висновок про один зі станів ЕД: справний, з незначними відхиленнями параметрів, передаварійний, аварійний та зменшити похибку прогнозування стану.

## 5. Висновки

Статистичні дані про пошкодження електродвигуна сформовані на основі досліджень підприємств агропереробної галузі України.

Розроблений метод визначення технічного стану електродвигуна в умовах неповноти початкових даних ґрунтується на результатах нейро-нечіткого моделювання в пакеті прикладних



програм Matlab.

Незважаючи на складність залежностей, математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу електродвигуна може бути використана для програмування нечіткого контролера з метою створення пристрою оперативного визначення стану електричних двигунів шляхом аналізу значення його коефіцієнта залишкового ресурсу.

#### Список використаних джерел

1. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. Вип. 4. С. 90–98.
2. Рубаненко О. Є., Видмиш А. А. Дослідження пошкоджень асинхронних двигунів 0,4 кВ. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. № 5. С. 188–195.
3. Гулько І. О. Аналіз програмних засобів для моделювання режимів роботи електричних систем. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2020. № 3. С. 138–141.
4. Buslavets O. A., Lezhniuk P. D., Rubanenko O. Y. Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. No. №2/8(74). P. 35–41.
5. Ткаченко А. А., Коновалов В. А., Лагуненков С. В. Разработка устройства диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2012. № 4. С. 76–81.
6. Рубаненко О. Є., Мисенко С. В., Рубаненко О. О. Вплив вібрації контактів на подальшу роботу високовольтних вимикачів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. № 1. С. 72–76.
7. Rubanenko Olexander, Kazmiruk Oleg, Bandura Valentyna, Matvijchuk Victor, Rubanenko Olena (2017). Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. № 4/3(88). P. 66–79.
8. Причины основных неисправностей двигателя: электронный ресурс. InfoElektrik. 26.06.2016. С. 76–81. URL: <http://infoelektrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html>.
9. Круглова Т. Н., Ярошенко И. В., Работалов Н. Н., Мельников М. А. Причины основных неисправностей двигателя: электронный ресурс. Высоковольтные измерительные комплексы и системы. URL: <http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigateley>.
10. Subhasis Nandi., Hamid A., Toliyat, Xiaodong Li. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. *IEEE transactions on energy conversion*. 2005. December. Vol. 20. No. 4. P. 719–729.
11. Rubanenko O. Y., Rubanenko O. O., Hryshchuk M. O. A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi. *Przegląd elektrotechniczny*. 2020. No. 3. P. 119–124.
12. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
13. 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.
14. Агамалов О. Н., Костерев Н. В., Лукаш Н. П. Применение нечёткой нелинейной авторегрессионной модели с внешним входом для оценки состояния электрооборудования. *Технічна електродинаміка*. 2004. № 2. С. 49–58.
15. Костырев Н. В., Бардик Е. И., Вожаков Р. В. Нечёткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования. *Наукові праці ДонНТУ Електротехніка і енергетика*. 2008. № 8. С. 65–70.

#### References

- [1] Kaletnik, H.M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomii pidprijemstv APK v ramkakh vykonannia enerhetychnoi stratehii Ukrainy. *Visnyk ahrarynoi nauky Prychornomor'ia*. 4. 90–98. [in Ukrainian].
- [2] Rubanenko, O. Ye., Vydmysh, A. A. (2020). Doslidzhennia poshkozhen asynkhronnykh dvyhuniv 0,4 kV. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 5. 188–195. [in Ukrainian].
- [3] Gunko I. O. (2020). Analiz prohramnykh zasobiv dlia modeliuvannia rezhymiv roboty elektrychnykh system. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. 3. 138–141. [in Ukrainian].
- [4] Buslavets, O. A., Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Y. (2015). Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. №2/8(74). 35–41. [in English].
- [5] Tkachenko, A. A., Konovalov, V. A., Lahunenkov, S. V. (2012). Razrabotka ustroystva diagnostirovaniya obryivov i mezhvitkovyih zamykaniy v statornyih obmotkah asinhronnyih dvigateley. *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii*. 4. 76–81. [in Russian].



- [6] Rubanenko, O. Ye., Mysenko, S. V., Rubanenko, O. O. (2013). Vplyv vibratsii kontaktiv na podalshu robotu vysokovoltnykh vumykhachiv. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh. 1.* 72–76. [in Ukrainian].
- [7] Rubanenko Olexander, Kazmiruk Oleg, Bandura Valentyna, Matvijchuk Victor, Rubanenko Olena (2017). Determination of optimal transformation ratios of power system transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 4/3(88). 66–79. [in English].
- [8] Prichinyi osnovnyih neispravnostey dvigatelya: elektronnyi resurs. InfoElektrik. 26.06.2016. S. 76–81. URL: <http://infoelektrik.ru/elektrodvigateli/osnovnye-neispravnosti-dvigatelya.html>. [in Russian].
- [9] Kruglova, T. N., Yaroshenko, I. V., Rabotalov, N. N., Melnikov, M. A. Prichinyi osnovnyih neispravnostey dvigatelya: elektronnyi resurs. Vyisokovoltnyie izmeritelnyie komplekxy i sistemyi. URL: <http://www.viks.su/blog/kompleksnaya-diagnostika-moshchnyh-elektrodvigatelye> [in Russian].
- [10] Subhasis, Nandi, Hamid, A., Toliyat, Xiaodong, Li. (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. *IEEE transactions on energy conversion.* December. 20(4). 719–729. [in English].
- [11] Rubanenko, O. Y., Rubanenko, O. O., Hryshchuk, M.O. (2020). A Planning of the experiment for the defining of the technical state of the transformer by using amplitude-frequency characteristi. *Przeglad elektrotechniczny.* 3. 119–124. [in English].
- [12] Leonenkov, A. V. (2003). *Nechetkoe modelyrovanye v srede MATLAB y fuzzy TECH.* SPb.: BKhV-Peterburh. [in Russian].
- [13] Normy vyprovovuvan elektroobladnannia: SOU-N EE 20.302:2007. (2007). K. : HRIFRE, M-vo palyva ta enerhetyky Ukrainy. Obiednannia enerhetychnykh pidpriemstv, DP MOU «Voienne vydavnytstvo Ukrainy «Varta». [in Ukrainian].
- [14] Agamalov, O. N., Kosterev, N. V., Lukash, N. P. (2004). Primenenie nechYotkoy nelineynoy avtoregressionnoy modeli s vneshnim vhom dlya otsenki sostoyaniya elektrooborudovaniya. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2. 49–58. [in Russian].
- [15] Kostyirev, N. V., Bardik, E. I., Vozhakov, R. V. (2008). Nechyotkie algoritmyi otsenki tehničeskogo sostoyaniya i prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektrooborudovaniya. *Elektrotehnika i enerhetyka.* 8. 65–70. [in Russian].

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В статье проанализированы повреждаемость электрических двигателей на агроперерабатывающих предприятиях Украины. С целью автоматизации процесса определения технического состояния электрических двигателей внедряются современные микропроцессорные системы. Их программное обеспечение реализует сложные и информативные методы определения текущего состояния электрических двигателей на основе анализа текущих значений диагностических параметров.

Текущие значения не всех диагностических параметров электрических двигателей известны на момент определения технического состояния. Поэтому применяются их прогнозные значения. Авторами предложено оценивать текущее техническое состояние электрических двигателей анализируя значение коэффициента его остаточного ресурса. Значения этих коэффициентов изменяются от 1 и.о. (Двигатель исправен) до 0 и.о. (Двигатель неисправен). На примере показано применение программного обеспечения, а именно, Anfis редактор приложения Fuzzy Logic Tool Box пакета прикладных программ Matlab для создания математической модели коэффициента остаточного ресурса электродвигателя. Отмечается, что погрешность обучения модели, основанной на 582 рассмотренных вариантах сочетаний диагностических параметров и соответствующих им значениях остаточного ресурса электродвигателя, не превышает 0,00288 и.о. (0,2%), а на тестовой избиратели 0,05904 (4,1%).

Учитывая большое количество взаимно влиятельных диагностических параметров электродвигателей, с целью упрощения оценки текущего технического состояния предлагаем использовать интегральный диагностический параметр – коэффициент остаточного ресурса. В то же время, сложно определять техническое состояние работающего электродвигателя, ведь некоторые диагностические параметры можно измерять в отключенного или разобранного электродвигателя (например, измерение сопротивления изоляции обмотки статора мегаомметром или измерения диаметра вала ротора под подшипником с целью выявления причины вибрации).

Поэтому определенный в темпе процесса, при таких условиях, техническое состояние работающего электродвигателя является прогнозируемым – нечетким. Для его определения следует использовать методы и средство нейро-нечеткого моделирования. Поэтому проблема повышения качества эксплуатации электродвигателей на агропромышленном производстве путем улучшения качества их диагностирования актуальна и имеет большое народнохозяйственное значение.

Ключевые слова: электрический двигатель, техническое состояние, диагностика, повреждения,





статор, ротор, нейро-нечеткое моделирование, коэффициент остаточного ресурса, функция принадлежности.

**Ф. 11. Рис. 11. Табл. 5. Лит. 15.**

### DETERMINATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ELECTRIC MOTOR UNDER INCOMPLETE INITIAL DATA CONDITIONS

*The article analyzes the damageability of electric motors at agricultural processing enterprises in Ukraine. Modern microprocessor systems are being introduced in order to automate the process of determining the technical condition of electric motors. Their software implements complex and informative methods for determining the current state of electric motors based on the analysis of the current values of diagnostic parameters.*

*The current values of not all diagnostic parameters of electric motors are known at the time of determining the technical condition. Therefore, their predicted values are applied.*

*The authors propose to evaluate the current technical condition of electric motors by analyzing the value of the coefficient of its residual life. The values of this coefficient vary from 1 p.p. (the engine is fine) to 0 p.p. (the engine is defective.) An example shows the use of software, namely, Anfis editor of the Fuzzy Logic Tool Box application of the Matlab application package, for creating a mathematical model of the residual life coefficient of an electric motor. It is noted that the error in training the model based on 582 considered variants of combinations of diagnostic parameters and the corresponding values of the residual life of the electric motor does not exceed 0.00288 p.p. (0.2%), and for test voters – 4.1%.*

*Taking into account the large number of mutually influential diagnostic parameters of electric motors, in order to simplify the assessment of the current technical condition, we propose to use the integral diagnostic parameter – the coefficient of residual life.*

*At the same time, it is difficult to determine the technical condition of a working electric motor, because some diagnostic parameters can be measured in a disconnected or disassembled electric motor (for example, measuring the insulation resistance of the stator winding with a megaohmmeter or measuring the diameter of the rotor shaft under the bearing in order to identify the cause of vibration). Therefore, determined at the rate of the process, under such conditions, the technical state of the operating electric motor is predictable – fuzzy. To determine it, one should use the methods and means of neuro-fuzzy modeling. Therefore, the problem of improving the quality of operation of electric motors in agricultural production by improving the quality of their diagnostics is relevant and of great national economic importance.*

**Key words:** electric motor, technical condition, diagnostics, damage, stator, rotor, neuro-fuzzy modeling, coefficient of residual life, membership function.

**F. 11. Fig. 11. Table. 5. Ref. 15.**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Рубаненко Олександр Євгенійович** – кандидат технічних наук, професор кафедри Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [rubanenkoae@ukr.net](mailto:rubanenkoae@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>).

**Токарчук Олексій Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [tokarchuk@vsau.vin.ua](mailto:tokarchuk@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

**Рубаненко Александр Евгеньевич** – кандидат технических наук, професор кафедры Электроэнергетики, электротехники и электромеханики Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [rubanenkoae@ukr.net](mailto:rubanenkoae@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>).

**Токарчук Алексей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры пехнологических процессов и оборудования перерабатывающих и пищевых производств Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [tokarchuk@vsau.vin.ua](mailto:tokarchuk@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

**Oleksandr Rubanenko** – Ph.D., Professor of the Department of “Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics” of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [rubanenkoae@ukr.net](mailto:rubanenkoae@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>).

**Oleksii Tokarchuk** – Ph.D., Associate Professor of the Department of “Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions” of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [tokarchuk@vsau.vin.ua](mailto:tokarchuk@vsau.vin.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).