

## ОПЕРАТИВНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

**О. Є. РУБАНЕНКО**

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*email: rubanenko@bk.ru

**АНОТАЦІЯ** В статті розглянуто пошкоджуваність високовольтних маслонаповнених вимірювальних трансформаторів струму 110 кВ та наведено приклад визначення поточного залишкового ресурсу цих трансформаторів в умовах неповноти початкових даних. Розроблено нейро-нечітку математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу трансформатора струму, яка дозволяє враховувати як результати поточного так і періодичного контролю діагностичних параметрів. На прикладі трансформатора ТФНД 110 показано можливість використання методів нейро-нечіткого моделювання у прогнозуванні залишкового ресурсу трансформаторів струму. Запропоновано оцінювати стан трансформаторів струму в залежності від значення коефіцієнту загального залишкового ресурсу під час керування режимами електроенергетичних систем.

**Ключові слова:** вимірювальні трансформатори струму високої напруги, он-лайн діагностика, нейро-нечітке моделювання, залишковий ресурс

## OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF HIGH VOLTAGE INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMERS

**O. RUBANENKO**

Department of Electric Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, UKRAINE

**ABSTRACT** The research contains the results the analysis of oil-filled high-voltage current transformers and selected diagnostic parameters that enable to detect main types of damage. It is shown that in case of the most common faults numerous diagnostic parameters are to be controlled and it is not always possible in conditions of electric power systems modes control by operative dispatching staff of power systems. To reduce the information load on the personal, responsible for decision-making regarding modes control it is proposed to use the parameter of total residual resource, the method of this parameter determination is given, based on the usage of remaining resource ratios, defined by individual diagnostic parameters, taking into account statistical data, concerning taking the current transformers out of service. It is proposed to determine these factors in relative units, that will simplify their usage while determining the ratio of general residual resource that varies from 1 during putting into operation to 0, that corresponds to taking the transformer out of service. Application of mathematical tools of neural-fuzzy modeling, namely Sugeno algorithm, allows to develop mathematical and computer models of total residual resource that enables to determine the impact of diagnostic parameters on the ratio of total residual resource. In training sample of neural-fuzzy model it is suggested to use data, verified by independent experts and taken from the test reports. It is shown that the current prediction error residual life does not exceed 14%. It is expected that the error can be reduced by increasing the training set, and the number of failures in the current transformer will reduce the defects in the early stages of development.

**Keywords:** high-voltage instrument current transformers, on-line diagnostics, neural-fuzzy modeling, residual resource

### Вступ

В наш час в електроенергетичних системах широко використовуються вимірювальні трансформатори струму [4], які відіграють важливу роль в забезпеченні безпечної, надійної, якісної та економічної роботи релейного захисту, технологічної та протиаварійної автоматики, вимірювальних комплексів та систем і т. п. Водночас, серед експлуатованих трансформаторів струму велика частка відпрацювала свій паспортний ресурс, тобто знаходяться в експлуатації понад 25 років. Часто це маслонаповнені трансформатори (табл. 1, рис. 1). В експлуатації все більше з'являється елегазових трансформаторів струму [10].

Таблиця 1 – Введення ТС в експлуатацію в Південно-Західній електроенергетичній системі

Роки	Маслонаповнені		Елегазові		
	110кВ	330 кВ	110 кВ	330 кВ	750 кВ
1965-70	65	7	0	0	0
1971-75	17	8	0	0	0
1976-80	27	21	0	0	0
1981-85	24	45	0	0	0
1986-90	10	32	0	0	0
1991-95	6	18	0	0	0
1996-00	3	0	0	0	0
2001-05	21	9	27	0	6
2006-10	20	16	0	20	3
2011-13	52	19	0	43	18

В наш час частка експлуатованих маслонаповнених трансформаторів струму залишається великою.

Відома залежність пошкоджуваності обладнання в залежності від терміну експлуатації (рис. 1).

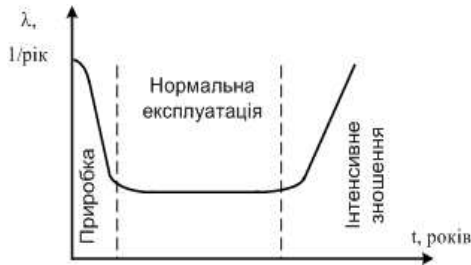


Рис. 1 – Залежність пошкоджуваності обладнання (одиниць за рік) від року експлуатації

Ця тенденція спостерігається і у високовольтних вимірювальних трансформаторів. На рис. 2 та 3 показані пошкоджені трансформатор напруги 35 кВ у 2015 році (перший рік експлуатації), трансформатор струму 750 кВ (понад 20 років експлуатації), та виведені з експлуатації трансформатори струму 750 кВ (а – 25 років експлуатації).



Рис. 2 – Пошкоджені в 2015 році трансформатор напруги 35 кВ (2014 року випуску)

Трансформатор струму ТФРМ-750 (виготовлений у 1982 р., масло Т-750) був виведений з експлуатації в 2007 р. на підстанції «Вінницька 750» (рис.3 б).



Рис. 3 – Виведені з експлуатації трансформатори струму 750 кВ

Отже пошкоджуваність такого вартісного та відповідального обладнання, як вимірювальні трансформатори струму свідчить про актуальність мети та завдань проведених досліджень.

### Мета досліджень

Метою досліджень є вдосконалення методів оперативного діагностування [9] вимірювальних трансформаторів струму (ТС) 110 кВ під час керування режимами електроенергетичних систем (ЕЕС).

### Дослідження пошкоджуваності трансформаторів струму ТФНД-110

Визначення поточного стану ТС ґрунтується на результатах як поточного так і періодичного контролю [1, 5–8, 11]. Наявність періодичної складової в початкових даних інформаційного забезпечення процесу визначення поточного технічного стану ТС свідчить про прогнозовані оцінки цього стану. Трансформатор ТФНД-110 є маслонаповненим трансформатором струму в фарфоровому корпусі зовнішнього встановлення.

Для пояснення запропонованого методу оперативного діагностування [2, 9] (табл.2 та рис. 6) наведені результати досліджень виведених з експлуатації для обслуговування, ремонту або заміни [3] трансформаторів струму ТФНД-110 на протязі десяти років в уявній ЕЕС.

Таблиця 2 – Пошкоджуваність ТФНД-110

Позначення діагностичного параметру (ДП)	Кількість виявлених відхилень (ДП)
$R_{вт.об}$	6
$tg(\delta)$	3
C	1
$t_1$	4
$t_2$	1
$t_3$	1
$k_{тр}$	8
$k_{кт}$	5
$P_1$	1
$k_{фха}$	6
$k_{харг}$	5 (з них 2 – горючі)
$k_{сел}$	70

До найбільш частих видів пошкоджень [3] відносяться: пошкодження основної ізоляції, що виявляються шляхом контролю діагностичних параметрів – опору ізоляції  $R_{із}$  (провідності ізоляції  $Y_{із}$ ), опору ізоляції через 15 секунд –  $R_{із,15''}$ , опору ізоляції через 60 секунд –  $R_{із,60''}$ , коефіцієнта абсорбції  $k_{абс}$  ( $k_{абс} = R_{із,60''}/R_{із,15''}$ ), опору ізоляції з'єднаних між собою вторинних обмоток відносно заземленого корпусу ТС –  $R_{вт.об}$ , тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції –  $tg(\delta)$ , ємності основної ізоляції – C; пошкодження перемикача коефіцієнту трансформації та якості контактів апаратних вводів, що виявляються шляхом контролю: надлишкової температури цього перемикача та апаратних вводів –  $t_1$ , надлишкової температури

розширювача ТС –  $t_2$ , надлишкової температури корпусу ТС –  $t_3$ , пошкодження магнітопроводу та обмоток ТС, що виявляються: шляхом контролю контрольних точок на кривій намагнічування ТС –  $k_{тр}$ , шляхом контролю коефіцієнта трансформації та класу точності –  $k_{кт}$ ; пошкодження ущільнень, що виявляється шляхом візуального спостереження за відсутністю або появою підтікань трансформаторного масла з під ущільнень і характеризуються надлишковим тиском трансформаторного масла всередині ТС за якого виникають підтікання  $P_1$ ; погіршення стану трансформаторного масла, яке виявляється: шляхом контролю параметрів фізико-хімічного аналізу трансформаторного масла та розрахунку поточного значення коефіцієнта залишкового ресурсу трансформаторного масла –  $k_{ФХА}$ , шляхом контролю вмісту розчинених в трансформаторному маслі газів (методами та засобами хімічного аналізу розчинених газів – ХАРГ) та розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу трансформаторного масла за результатами ХАРГ –  $k_{ХАРГ}$  та шляхом візуального контролю кольору силікагелю –  $k_{сел}$  (зволоження трансформаторного масла).

#### Моделювання залишкового ресурсу трансформатора струму

Проведення оперативного діагностування [9] високовольтних ТС в умовах неповноти даних на момент визначення поточного стану ТС пов'язано з необхідністю продовження експлуатації зношеного електрообладнання (ЕО) енергопідприємств.

За результатами аналізу даних таблиці 2 та літературних джерел була створена схема, яка показує взаємно-залежний діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТС (рис. 4).



Рис.4 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТС

На рис. 4 послідовні позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ТС в ремонт, а паралельно – блоки з параметрами, які сприяють виведенню ТС в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ТС.

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ТС, 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 ТС від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення,

тобто залишковий технічний ресурс [10]. Коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_i$  за  $i$ -м діагностичним параметром:

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

де  $x_{iI,гран}$  – граничне нормативне значення  $i_I$ -го діагностичного параметра,  $x_{iI,ном}$  – значення  $i_I$ -го діагностичного параметра на момент контролю,  $x_{iI,поч}$  – початкове значення  $i_I$ -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту),  $i_I$  – діагностичний параметр.

Так, для високовольтного ТС на клас напруги 110 кВ параметр  $tg(\delta)$  паперово – масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,2 %, а на момент контролю дорівнював 0,4 %, граничне значення цього параметра – 1,0 %. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_{tg(\delta)}$  за діагностичним параметром  $tg(\delta)$  визначається за виразом (2):

$$k_{tg(\delta)} = \frac{3.5 - 1.0}{3.5 - 0.5} = 0.833(в.о.).$$

Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (2)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ТС по  $\tau$ -му діагностичному параметру,  $\tau$  –  $\tau$ -тий діагностичний параметр,  $\nu$  – кількість блоків у послідовній частині схеми рис. 8,  $p_{\tau}$  – ймовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра:

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3)$$

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.

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

$$k_{pec\Sigma} = 1 - \sum_{j=1}^{mI} [(1 - k_{pec,j}) p_j], \quad (4)$$

де  $k_j$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ТС за  $j$ -м діагностичним параметром,  $j$  –  $j$ -тий діагностичний параметр,  $m_1$  – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається.

Відповідно до виразів (3) і (4) та рис. 7 коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВУ визначається за виразом (5):

$$k_{заг.рес} = k_{R_{от.об}}^{P_{R_{от.об}}} \cdot k_{tg(\delta)}^{P_{tg(\delta)}} \cdot k_C^{P_C} \cdot \left[ \left[ (1-k_{T1}) \cdot P_{нар.ч.T1} + (1-k_{T2}) \cdot P_{нар.ч.T2} + (1-k_{T3}) \cdot P_{нар.ч.T3} \right]^{P_{узаг.ч.T1.T2.T3}} \cdot k_{ТР}^{P_{ТР}} \cdot k_{КТ}^{P_{КТ}} \cdot k_{Р1}^{P_{Р1}} \cdot k_{ФХА}^{P_{ФХА}} \cdot k_{ХАРГ}^{P_{ХАРГ}} \cdot k_{сел}^{P_{сел}}$$

де  $k_{ТР}$ ,  $k_{КТ}$ ,  $k_{R_{от.об}}$ ,  $k_C$ ,  $k_{tg(\delta)}$ ,  $k_{ФХА}$ ,  $k_{ХАРГ}$ ,  $k_{Р1}$ ,  $k_{T2}$ ,  $k_{T1}$ ,  $k_{T3}$ ,  $k_{сел}$  – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах  $ТР$ ,  $КТ$ ,  $R_{от.об}$ ,  $C$ ,  $tg(\delta)$ ,  $T_3$ ,  $ХАРГ$ ,  $ФХА$ ,  $P_1$ ,  $T_2$ ,  $T_1$ ;  $P_{R_{от.об}}$ ,  $P_{ФХА}$ ,  $P_R$ ,  $P_C$ ,  $P_{tg(\delta)}$ ,  $P_{T3}$ ,  $P_{ХАРГ}$ ,  $P_{P1}$ ,  $P_{T2}$ ,  $P_{T1}$  – ймовірності відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень всіх діагностичних параметрів;  $P_{нар.ч.T1}$ ,  $P_{нар.ч.T2}$ ,  $P_{нар.ч.T3}$  – ймовірності відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів лише паралельної частини схеми;  $P_{узаг.ч.T1.T2.T3}$  – ймовірність відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень для узагальненого (паралельної частини схеми) блоку (в послідовній частині схеми) з урахуванням загальної кількості відхилень діагностичних параметрів. Так, відповідно до табл. 2:  $r_{сел}=0,631$  в.о.,  $r_{R_{от.об}}=0,054$  в.о.,  $r_C=0,009$  в.о.,  $r_{tg(\delta)}=0,027$  в.о.,  $r_{T3}=0,009$  в.о.,  $r_{ХАРГ}=0,045$  в.о.,  $r_{P1}=0,009$  в.о.,  $r_{T2}=0,009$  в.о.,  $r_{T1}=0,036$  в.о.,  $r_{ТР}=0,072$  в.о.,  $r_{КТ}=0,045$  в.о.,  $r_{ФХА}=0,054$  в.о.,  $r_{нар.ч.T1} = r_{T1}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,66$  в.о.,  $r_{нар.ч.T2}=r_{T2}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,17$  в.о.,  $r_{нар.ч.T3} = r_{T3}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,17$  в.о.,  $r_{узаг.ч.T1.T2.T3} = r_{T1}+r_{T2}+r_{T3}=0,054$  в.о.

**Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТС**

Задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан ТС і якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень і їх впливу на загальний технічний стан.

Використання для вирішення поставленої задачі методів теорії нечітких множин дає змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ТС 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 ТС, використовуючи яку відредагувати раніше створену ймовірнісну вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залиш-

кового ресурсу ТС від діагностичних параметрів у вигляді поліному.

Для дванадцяти вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТС за виразом (5). 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. Результати розрахунків зведені в таблицю.

Повна таблиця містить 2600 розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ТС. Далі у 100 рядках цієї таблиці було скореговано значення коефіцієнту залишкового ресурсу ТС шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників цеху ремонту ТС служби ремонтів високовольтного обладнання, служби підстанцій, служби ізоляції, діагностування та грозозахисту, монтажної та інших організацій. В останній комірці табл. 3 показано відкоригований рядок.

Таблиця 3 – Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ТС

Діагностичні параметри, в.о.											$k_{заг.рес.}$ , в.о.	
$k_{R_{от.об}}$	$k_{tg(\delta)}$	$k_C$	$k_{T1}$	$k_{T2}$	$k_{T3}$	$k_{ТР}$	$k_{КТ}$	$k_{P1}$	$k_{ФХА}$	$k_{ХАРГ}$		$k_{сел}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,95	0,95	0,95	0,5	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,5	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,6

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 з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТФНД-110 кВ. Отримана структура нейро-мережі показана на рис. 5.

Для кожної вхідної змінної нечіткої моделі використовувались по чотири лінгвістичних терми з гаусовими функціями. Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметра, «незначні відхилення» значення діагностичного параметра,

«передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметра.

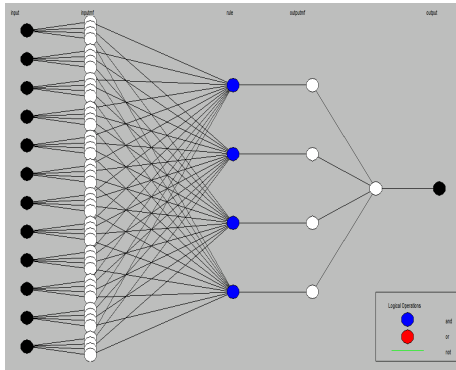


Рис. 5 – Структура нейро-мережі ТС

Для визначення значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ВУ використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (6):

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА...} x_m \in V_m \\ \in V_i \text{ ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{aligned} \quad (6)$$

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

Математична модель загальнозалишкового ресурсу є системою логічних рівнянь фрагмент якої показаний в (7):

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } k_{\text{ФАХ}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Ротор.об.}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{С}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{ІГ(6)}} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{КР}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Р1}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Т2}} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ ТА } k_{\text{Т1}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{ТР}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Сел.}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТО } \\ k_{\text{заг.залирес}} = a_{1,1} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,2} \cdot k_{\text{Ротор.об.}} + a_{1,3} \cdot k_{\text{С}} + a_{1,4} \cdot k_{\text{ІГ(6)}} + a_{1,5} \cdot k_{\text{Т3}} + a_{1,6} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,7} \cdot k_{\text{Р1}} \\ + a_{1,8} \cdot k_{\text{Т2}} + a_{1,9} \cdot k_{\text{Т1}} + a_{1,10} \cdot k_{\text{ТР}} + a_{1,11} \cdot k_{\text{КР}} + a_{1,12} \cdot k_{\text{Сел.}} + c_1 \\ \dots \\ \text{ЯКЩО } k_{\text{ФАХ}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Ротор.об.}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{С}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{ІГ(6)}} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{КР}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Р1}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Т2}} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ ТА } k_{\text{Т1}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{ТР}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Сел.}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТО } \\ k_{\text{заг.залирес}} = a_{1,1} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,2} \cdot k_{\text{Ротор.об.}} + a_{1,3} \cdot k_{\text{С}} + a_{1,4} \cdot k_{\text{ІГ(6)}} + a_{1,5} \cdot k_{\text{Т3}} + a_{1,6} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,7} \cdot k_{\text{Р1}} \\ + a_{1,8} \cdot k_{\text{Т2}} + a_{1,9} \cdot k_{\text{Т1}} + a_{1,10} \cdot k_{\text{ТР}} + a_{1,11} \cdot k_{\text{КР}} + a_{1,12} \cdot k_{\text{Сел.}} + c_1 \end{aligned} \quad (7)$$

де  $a, c$  – параметри висновків правил нечіткої моделі.

Ознакою припинення навчання моделі є незмінність середньоквадратичної похибки. Середньоквадратична похибка після 8 епох навчання становить 0,06 в. о.

Похибка моделі з використанням контрольної вибірки становить 0,11 в. о.

## Висновки

Під час керування режимами ЕЕС оперативно-диспетчерський персонал визначає стан задіяного обладнання [9] за показами контрольно-вимірювальних приладів.

Використовуючи математичний апарат нейронічного моделювання розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу, яка дозволяє визначити вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу.

## Список літератури

- 1 **Стогній, Б.С.** Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу / **Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель** // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – №1. – С. 62-69.
- 2 **Лежнюк, П. Д.** Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / **П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. В. Нікіторович** // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 35-36.
- 3 **Федоренко, Г. М.** Комплексний аналіз аварійних ситуацій генеруючого обладнання електростанцій / **Г. М. Федоренко, О. Г. Кенцицький** // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 2. – С. 48-49.
- 4 **Gray, W.** Voltage transformers and current transformers associated with switchgear / **W. Gray, A. Wright** // *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*. – 2010. – vol. 100. – P. 223-236. – doi:10.1049/pi-2.1953.0089.
- 5 **Harper, G.** The selection of insulation levels and tests for high-voltage transformers / **G. B. Harper** // *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*. – 2010. – Vol. 106. – P. 429 - 444. – doi:10.1049/pi-a.1959.0116.
- 6 **Saponara, S.** Predictive Diagnosis of High-Power Transformer Faults by Networking Vibration Measuring Nodes With Integrated Signal Processing / **S. Saponara, L. Fannucci, F. Bernardo, A. Falciani** // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* – 2016. – P. 1-12. – doi:10.1109/TIM.2016.2552658.
- 7 **Boczar, T.** Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method / **T. Boczar, A. Cichon, S. Borucki** // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* – 2014. – Vol. 21. – P. 854-865. – doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 8 **Bahmani, M.** Comparative Study of a Multi-MW High-Power Density DC Transformer With an Optimized High-Frequency Magnetics in All-DC Offshore Wind Farm / **M. Bahmani, T. Thiringer, A. Rabiei, T. Abdulahovic** // *IEEE Transactions on power delivery* – 2016. – No. 2. – P. 857-866. – doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 9 **Buslavets, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / **O. Buslavets, P. Legnuk, O. Rubanenko** // *Eastern-European journal of enterprise technologies* – 2015. – No. 2/8 (74). – P. 35-41. – doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 10 **Pilzecker, P.** Evaluation of gas insulated substations and circuit breakers using partial discharge - IMS / **P. Pilzecker, J. I. Baumbach** // *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on* – 2002. – P. 399-402. – doi:10.1109/ELINSL.2002.995960.
- 11 **Mentlik, V.** On-line diagnostics of power transformers / **V. Mentlik, P. Prosr, J. Pihera, R. Polansky** // *Conference*

*Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation – 2006. – P. 546-549. – doi:10.1109/ELINSL.2006.16653772006.*

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Stohnii, B. S., Sopol, M. F.** Osnovy monitorynhu v elektroenerhetytsi. Pro poniattia monitorynhu [Fundamentals monitoring in power. On the concept of monitoring] *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2013, **1**, 62-69.
- 2 **Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ie., Nikitorovych, O. V.** Operatyvne diahnostuvannya vysoko vol- toho obladnannia v zadachakh optimalnoho keruvannia rezhymamy elektroenerhetychnykh system [High-operative diagnosis-tnoho equipment in problems of optimal control mode of the electro-nerhetychnykh]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2012, **3**, 35-36.
- 3 **Fedorenko, H. M., Kentsytskiy, O. H.** Kompleksnyi analiz avariynykh situatsii heneruii choho obladnannia elektrostantsii [Comprehensive analysis of the emergency power generating equipment]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2012, **2**, 48-49.
- 4 **Gray, W., Wright, A.** Voltage transformers and current transformers associated with switchgear. *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*, 2010, **100**, 223-236, doi:10.1049/pi-2.1953.0089.
- 5 **Harper, G.** The selection of insulation levels and tests for high-voltage transformers. *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*, 2010, **106**, 429 - 444, doi:10.1049/pi-a.1959.0116.
- 6 **Saponara, S., Fanucci, L., Bernardo, F., Falciani, A.** Predictive Diagnosis of High-Power Transformer Faults by Networking Vibration Measuring Nodes With Integrated Signal Processing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 1-12, doi:10.1109/TIM.2016.2552658.
- 7 **Boczar, T., Cichon, A., Borucki, S.** Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, **21**, 854-865, doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 8 **Bahmani, M., Thiringer, T., Rabiei, A., Abdulahovic, T.** Comparative Study of a Multi-MW High-Power Density DC Transformer With an Optimized High-Frequency Magnetics in All-DC Offshore Wind Farm. *IEEE Transactions on power delivery*, 2016, **2**, 857-866, doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 9 **Buslavets, O., Legnuk, P., Rubanenko, O.** 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, **2/8(74)**, 35-41, doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 10 **Pilzecker, P., Baumbach, J. I.** Evaluation of gas insulated substations and circuit breakers using partial discharge – IMS. *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium*, 2002, 399-402, doi:10.1109/ELINSL.2002.995960.
- 11 **Mentlik, V., Prosr, P., Pihera, J., Polansky, R.** On-line diagnostics of power transformers. *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, 546-549, doi:10.1109/ELINSL.2006.1665377.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Рубаненко Олександр Євгенійович** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний університет, доцент кафедри електричних станцій та системи; м. Вінниця, Україна; e-mail: rubanenko@bk.ru

**Rubanenko Olexander Evhenevych** – Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor, Vinnytsia National Technical University, Assistant Professor of the Chair of Electric Stations and Systems; Vinnytsia, Ukraine; e-mail: rubanenko@bk.ru

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Рубаненко, О. Є.** Оперативне діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів струму / **О. Є. Рубаненко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

*Please cite this article as:*

**Rubanenko, O.** Operational diagnostics of high voltage instrument current transformers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 107-112, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Рубаненко, А. Е.** Оперативное диагностирование высоковольтных измерительных трансформаторов тока / **А. Е. Рубаненко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрена повреждаемость высоковольтных маслонаполненных измерительных трансформаторов тока 110 кВ и приведен пример определения текущего остаточного ресурса этих трансформаторов в условиях неполноты исходных данных. Разработана нечеткая математическая модель коэффициента остаточного ресурса трансформатора тока, которая позволяет учитывать как результаты текущего так и периодического контроля диагностических параметров. На примере трансформатора ТФНД 110 показана возможность использования методов нейро-нечеткого моделирования в прогнозировании остаточного ресурса трансформаторов тока. Предложено оценивать состояние трансформаторов тока в зависимости от значения коэффициента общего остаточного ресурса при управлении режимами электроэнергетических систем.

**Ключевые слова:** измерительные трансформаторы тока высокого напряжения, он-лайн диагностика, нейро-нечеткое моделирование, остаточный ресурс

Надійшла (received) 12.05.2016