

# ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ НЕЧІТКИМ МОДЕЛЮВАННЯМ

Бардик Є.І., к.т.н., доцент, Заклюка І.В., аспірант

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії*

**Вступ.** В умовах лібералізації електроенергетичної галузі України значно зростають вимоги щодо забезпечення надійності електропостачання споживачів, зокрема якості електроенергії. Відхилення параметрів якості електроенергії, з яких одним з основних є напруга на затискачах споживачів, жорстко регламентується і допускається в нормальних режимах роботи  $\pm 5\%$  від номінальної напруги і  $\pm 10\%$  в аварійних [1, 3, 5]. Разом з цим, аналіз аварійності в сучасних ЕЕС з електростанціями різних типів показує, що вірогідність виникнення аварійних ситуацій в ЕЕС зі значним відхиленням напруги і частоти повністю не виключена. Основним чинником, який суттєво впливає на надійність функціонування електроенергетичної галузі є значне зношення електрообладнання, зокрема СТ, які належать до найбільш поширених і відповідальних елементів енергосистеми [2, 4]. Тому важливими є питання оцінки технічного стану окремих функціональних вузлів СТ, зокрема пристроїв РПН, та врахування ресурсних обмежень при реалізації алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження пристроями РПН СТ.

**Мета роботи.** Метою роботи є побудова нечіткої математичної моделі оцінки технічного стану пристроїв РПН силових масляних трансформаторів.

**Матеріали та результати досліджень.** Практика експлуатації пристроїв РПН СТ показує, що ресурс його елементів невеликий і тому ремонтне обслуговування передбачає виведення СТ з експлуатації з відповідним перериванням електропостачання споживачів. Проведений аналіз аварійності потужних СТ за період 1985-2010рр. показує, що частка аварійних ситуацій, спричинених відмовами пристроїв РПН, сягає 15-40 % [5]. У зв'язку з цим автоматичні регулятори напруги часто відключають від мережі, що призводить до зниження якості електроенергії. Тому важливою задачею є розробка нових та удосконалення існуючих методів і моделей оцінки технічного стану та алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження пристроями РПН СТ.

Складність виявлення аналітичних залежностей між зміною параметрів ТС і класом ТС об'єкта потребує для побудови відповідних моделей оцінки ТС пристроїв РПН використання методів інтелектуального аналізу даних [5], що дозволяє подати в єдиній формі різномірну інформацію про об'єкт. В цьому випадку ефективно використання теорії нечітких множин як для задач діагностування ТС пристроїв РПН, так і вибору та формування алгоритмів регулювання напруги. Таким чином необхідно розробити лінгвістичну модель оцінки технічного стану пристроїв РПН СТ на основі інтелектуального аналізу даних.

*Лінгвістична модель оцінки ТС пристроїв РПН СТ.* Найбільш поширеними дефектами і пошкодженнями пристроїв РПН СТ є: погіршення

характеристик масла, перегрівання контактів контактора, знос ущільнень контактора та контактів вибірника, механічний знос пристрою РПН, пошкодження кінематики привода [1, 3-5]. Для оцінки ТС пристроїв РПН використовують наступні випробування і вимірювання [5, 7] : хроматографічний аналіз розчинених в контакторі РПН газів; фізико-хімічний аналіз характеристик масла контактора; визначення параметрів ТС приводу РПН; вимірювання параметрів струмоведучих частин контактора.

В межах можливого діапазону змінення параметрів ТС пристроїв РПН можна визначити наступні області нормальних і аномальних режимів роботи: d1- «область нормального функціонування», інтервал від значень параметрів після введення в дію (або після ремонту) до значень, які обмежують область нормального стану в експлуатації; d2- «область ризику експлуатації пристроїв РПН» , інтервал значень параметрів, що обмежують область нормального стану до гранично допустимих значень в експлуатації; d3- «область функціонування за наявності дефекту (передаварійний стан)», хоча б один з параметрів стану РПН перевищує гранично допустимі значення в експлуатації.

Лінгвістичні змінні і терм-множини діагностичних параметрів ТС нечіткої бази знань математичної моделі оцінки технічного стану пристроїв РПН, сформовані за результатами ХАРГ (концентрації газів  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ), фізико-хімічного аналізу (тангенс дельта діелектричних втрат в трансформаторному маслі  $tg\delta$ , пробивна напруга  $U_{пр}$ , вологовміст в трансформаторному маслі контактора  $W$ , кислотне число КОН ), моніторингу привідного механізму (струм електричного двигуна приводу  $I$ ), випробувань струмоведучих частин трансформатора і контактора (перехідний опір контактів контактора  $R$ ) є такими [1,3-5]:

*Інтерпретація результатів ХАРГ .* У нормально працюючому РПН склад газів у контакторі відповідає дуговому руйнуванню (внаслідок дугового розряду) масла з основними газами  $H_2$  та  $C_2H_2$ . В процесі зношення контактів підвищується рівень їх нагрівання і перегрівання згідно з критеріями (таблиця 1) та зростає концентрація  $C_2H_4$  відносно  $C_2H_2$ . Для діагностики пошкодження контактів використовують відношення газів, що характеризують нагрівання,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$  та  $CH_4$  до «дугового» газу  $C_2H_2$ ,  $C_1 = \frac{C_2H_4}{C_2H_2}$ ,

$$C_2 = \frac{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4}{C_2H_2}.$$

Таблиця 1 – Критерій перегрівання контактів у контакторі

Відношення газів	«Нормальний режим»	«Потребує уваги»	Можливе пошкодження
$C_1$	$<1$	$\geq 1; \leq 5$	$\geq 5$
$C_2$	$<0,8$	$\geq 0,8; \leq 4$	$\geq 4$

Проведений аналіз основних факторів і параметрів, які в значній мірі впливають на ризик відмови пристроїв РПН в процесі експлуатації є: зношення

контактів контактора, що характеризується відношенням газів ( $C_1$ ) та ( $C_2$ ); струм електродвигуна приводу РПН  $I$ ; перехідний опір контактів контактора  $R$ . Сформовані вхідні лінгвістичні змінні нечіткої моделі оцінки технічного стану пристроїв РПН СТ є такі:  $C_1 = \{T_{C1}^L, T_{C1}^M, T_{C1}^B\}$  – відношення газів  $C_1 = \frac{C_2 H_4}{C_2 H_2}$ , в.о.;  $C_2 = \{T_{C2}^L, T_{C2}^M, T_{C2}^B\}$  – відношення газів  $C_2 = \frac{CH_4 + C_2 H_6 + C_2 H_4}{C_2 H_2}$ , в.о.;  $C_3 = \{T_{C3}^L, T_{C3}^M, T_{C3}^B\}$  – струм електричного двигуна приводу РПН,  $I$ , А;  $C_4 = \{T_{C4}^L, T_{C4}^M, T_{C4}^B\}$  – перехідний опір контактів контактора,  $R$ , Ом.

Терм-множинам  $T_{C_i}^j$  вхідних лінгвістичних змінних привласнені такі значення:  $T_{C_i}^L$  – низьке значення параметра (відповідає стану пристроїв РПН – «d1»);  $T_{C_i}^M$  – середнє значення параметра (відповідає стану пристроїв РПН – «d2»);  $T_{C_i}^B$  – високе значення параметра (відповідає стану пристроїв РПН – «d3»). Функції належності термів вхідних лінгвістичних змінних моделі оцінки технічного стану пристроїв РПН СТ представлені на рис. 1.

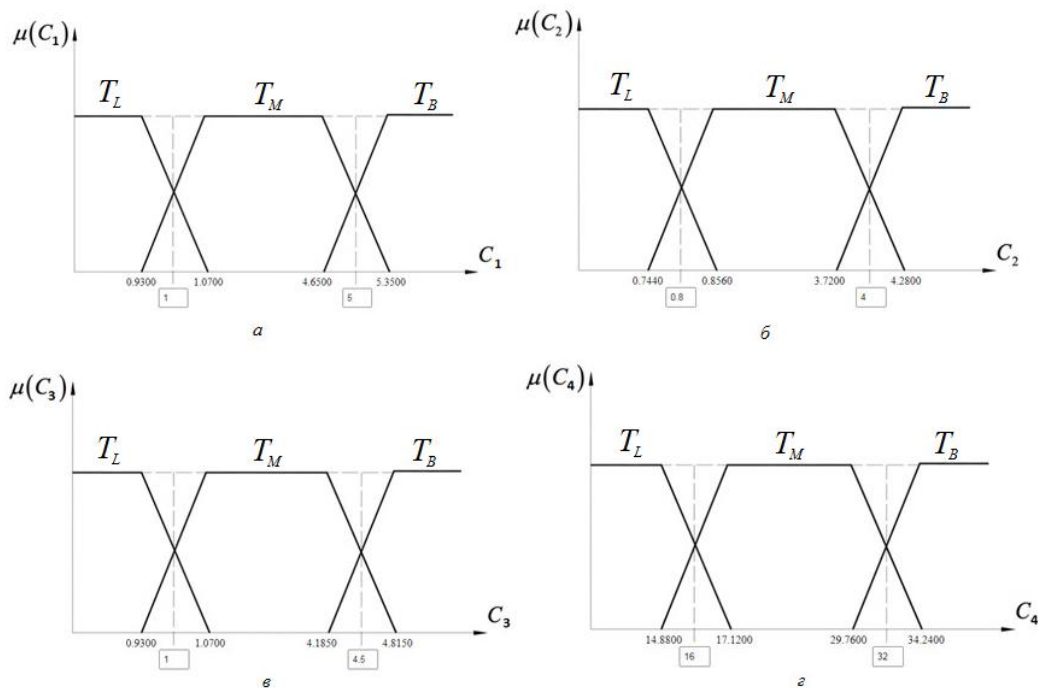


Рисунок 1 – Базові форми функцій приналежності нечітких термів вхідних лінгвістичних змінних: а –  $C_1$ , б –  $C_2$ , в –  $C_3$ , г –  $C_4$ .

Розроблена база правил для класифікації ТС пристроїв РПН СТ має вигляд:

1. IF ( $C_1 = T_{C1}^L$ ), AND ( $C_2 = T_{C2}^L$ ), AND ( $C_3 = T_{C3}^L$ ), AND ( $C_4 = T_{C4}^L$ ), THEN  $d = d_1$
2. IF ( $C_1 = T_{C1}^L$ ), AND ( $C_2 = T_{C2}^L$ ), AND ( $C_3 = T_{C3}^L$ ), AND ( $C_4 = T_{C4}^M$ ), THEN  $d = d_1$
3. IF ( $C_1 = T_{C1}^L$ ), AND ( $C_2 = T_{C2}^L$ ), AND ( $C_3 = T_{C3}^M$ ), AND ( $C_4 = T_{C4}^L$ ), THEN  $d = d_1$

.....

25. IF  $(C_1 = T_{C1}^M)$ , AND  $(C_2 = T_{C2}^L)$ , AND  $(C_3 = T_{C3}^M)$ , AND  $(C_4 = T_{C4}^M)$ , THEN  $d = d_2$   
 26. IF  $(C_1 = T_{C1}^M)$ , AND  $(C_2 = T_{C2}^L)$ , AND  $(C_3 = T_{C3}^M)$ , AND  $(C_4 = T_{C4}^B)$ , THEN  $d = d_2$   
 .....  
 80. IF  $(C_1 = T_{C1}^B)$ , AND  $(C_2 = T_{C2}^B)$ , AND  $(C_3 = T_{C3}^B)$ , AND  $(C_4 = T_{C4}^M)$ , THEN  $d = d_3$   
 81. IF  $(C_1 = T_{C1}^B)$ , AND  $(C_2 = T_{C2}^B)$ , AND  $(C_3 = T_{C3}^B)$ , AND  $(C_4 = T_{C4}^B)$ , THEN  $d = d_3$

*Класифікація технічних станів пристроїв РПН СТ.* Задача класифікації згідно з [8] полягає у віднесенні об'єкта, заданого вектором інформативних ознак  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , до одного з наперед описаних класів  $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ .

Для представленої вище бази правил ступені належності об'єкта  $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  класам  $d_j$  визначаються:

$$\mu_{dj} = (X^*) = \max_{p=1..k_j} w_{jp} \min_{i=1..n} (\mu_{jp}(x_i^*)), j = 1, m,$$

де  $\mu_{jp}(x_i)$  – функція належності входу  $x_i$  нечіткому терму  $a_{i,jp}$ ;  $a_{i,jp}$  – нечіткий терм, яким оцінюється змінна  $x_i$  в правилі з номером  $jp$ ,  $p = 1..k_j$ ;  $k_j$  – кількість правил, що описують клас  $d_j$ .

В якості рішення обирають клас з максимальним ступенем належності:

$$y^* = \arg \max (\mu_{d1}(X^*), \mu_{d2}(X^*), \dots, \mu_{dm}(X^*)).$$

Структура функціональних зв'язків лінгвістичної моделі оцінки ТС пристроїв РПН СТ наведена на рис. 2

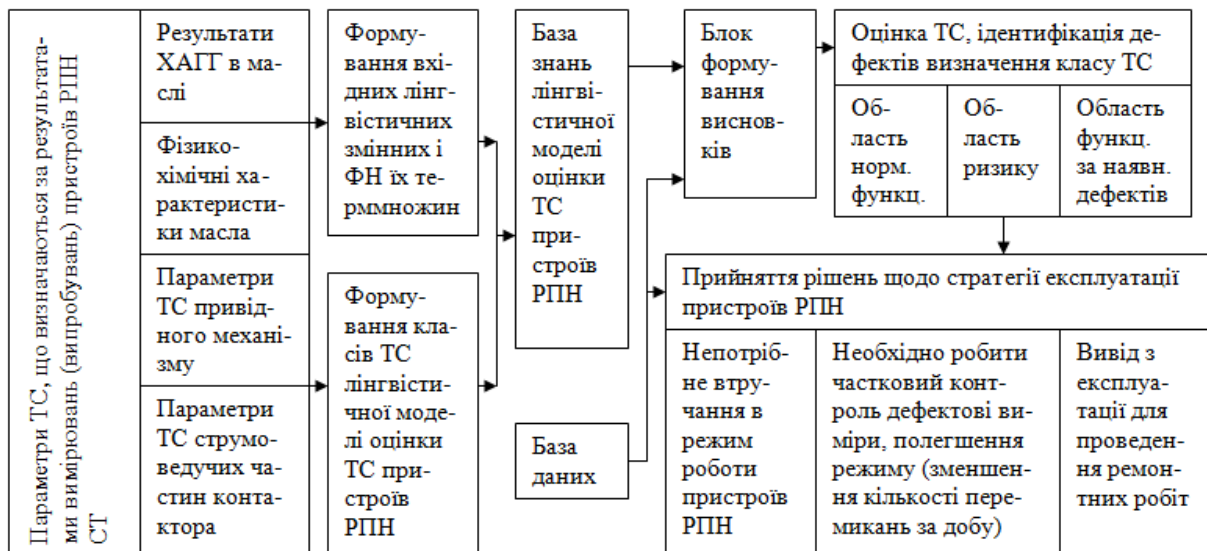


Рисунок 2 – Структурна схема функціональних зв'язків лінгвістичної моделі оцінки ТС пристроїв РПН СТ

Для силових трансформаторів напругою 110кВ, зокрема, трансформатора типу ТДН-40000/110 підстанції системи електропостачання в таблицях 2 і 3 наведено вихідні дані та результати модельно-експериментального діагностування ТС пристроїв РПН для різних сполучень параметрів ТС в 15-ти експлуатаційних режимах.

Таблиця 2 – Результати моніторингу параметрів ТС пристроїв РПН СТ у різних експлуатаційних режимах

№	$C_2H_6$ мкг/л	$C_2H_4$ мкг/л	$C_2H_2$ мкг/л	$CH_4$ мкг/л	$\frac{C_2H_4}{C_2H_2}$	$\frac{CH_4+C_2H_6+C_2H_4}{C_2H_2}$	I, А	R, мкОм
1/2	85/275	194/325	37/120	4,5/3,7	5,243/2,7	7,662/4,15	2,3/4,8	16,16/31
3/4	50/190	50/302	10/60,4	1/5	5/5	10,1/8,22	1/3,8	16/16,9
5/6	51/25	95/10	46/10	4,5/0,5	2/1	3,27/3,55	2/1	17/16,3
7/8	2/110	25/176	30/60,4	0,2/10	0,83/2,91	0,9/4,9	0,85/2,5	15,35/13,5
9/10	60/88	185/125,5	47,8/87	21,5/15,6	3,8/3,2	5,57/4,1	0,41/1,05	16,89/15,86
11/12	63,5/16	98/24	133/26	26/1,5	0,73/0,923	1,4/1,596	0,5/2	15/17,5
13/14	90/54	156/86	45/48	30/54	4,466/1,8	6,133/4,1	0,8/4,65	16/25,5
15	34	47	120	14	0,38	0,8	0,49	14,9

Таблиця 3 – Результати класифікації технічного стану пристроїв РПН силового трансформатора

№	Значення функції належності до класу технічного стану РПН силового трансформатора			Максимальне значення $\mu_{Dmax}$	Визначений клас технічного стану
	$\mu_{D1}$	$\mu_{D2}$	$\mu_{D3}$		
1 5	0,59	0,054	0	0,59	d1
7	0,79	0,21	0	0,79	d1
1 3	0	0,5	0	0,5	d2
1 0	0	0,56	0	0,56	d2
9	0	0,9	0	0,9	d2
5	0	0,95	0	0,95	d2
1	0	0,153	0,572	0,572	d3
1 4	0	0,313	0,69	0,69	d3

**Висновки.** Забезпечення необхідного рівня надійності функціонування, якості електроенергії сучасних ЕЕС потребує врахування ТС і ресурсу працездатності СТ при реалізації алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження. Розроблено нечітку модель визначення класу ТС і прийняття рішень щодо стратегії експлуатації пристроїв РПН СТ. Проведене модельно-експериментальне діагностування ТС пристроїв РПН трансформатора типу

ТДН-40000/110 підстанції системи електропостачання для різних сполучень параметрів ТС в 15-ти експлуатаційних режимах підтвердили адекватність запропонованої математичної моделі та доцільність і ефективність нечіткого моделювання.

#### Перелік посилань

1. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН: монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 109 с.
2. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. / -К.:НТУУ "КПІ", 2011. - 148 с.
3. Порудоминский В. В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. Изд. 2-е, перер. и исправ. Трансформаторы. Выпуск 25. М. Энергия 1974 г. 288 с.
4. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой // Мировая энергетика. – 1996.
5. Алексеев Б.А. Контроль состояния устройств регулирования трансформаторов под нагрузкой. // ЭЛЕКТРО. – 2008, № 4, с. 41-46.
6. Vardyk E., Volotnyi N. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data // Eastern-european journal of enterprise technologies – 2017. – 6/8 (90). – pp. 4-10.
7. Ю. О. Карпов, П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, М. І. Пиріжок. Прогнозування якості функціонування пристроїв регулювання під напругою трансформаторів в умовах нечітких результатів випробовувань. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2001. - № 5. - С. 58-65.
8. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2007. – 288 с.