

## НЕЧІТКА МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИСТРОЯМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Бардик Є.І., к.т.н., доц., Стеблик В.В., магістрант

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

Пристрої регулювання напруги під навантаженням (РПН) силових трансформаторів належать до найбільш відповідальних вузлів силових трансформаторів і в значній мірі визначають надійність їх функціонування, а також забезпечують якість електричної енергії в електроенергетичних системах (ЕЕС). Як показує практика експлуатації, ресурс елементів пристроїв РПН невеликий і тому ремонт їх трудоємкий і супроводжується виводом силового трансформатора з роботи, що викликає припинення електропостачання споживачів [1, 2]. Тому автоматичні регулятори напруги силових трансформаторів часто відключаються і, відповідно, якість напруги знижується, а втрати від неякісного електропостачання зростають.

Наразі є важливим розробка ефективних методів і моделей діагностування технічного стану і регулювання напруги пристроїв РПН силових трансформаторів. Як показує практика експлуатації, пристрій РПН є достатньо складним і ненадійним елементом силового трансформатора, аварія на якому може призвести до вибухів, пожеж, що супроводжуються значними збитками. Проведений аналіз пошкоджень силових трансформаторів потужністю більш 100 МВА за період 1985-2005 р.р. показує, що частка катастрофічних аварій по причинам пошкодження РПН сягає 15-40 %. Згідно з даними компанії ConEd- (США) більш ніж 50% витрат на ремонт трансформатора пов'язано з пристроями РПН.

Найбільш поширеними дефектами і пошкодженнями пристроїв РПН трансформаторів є: погіршення характеристик масла, перегрівання контактів контактора, знос ущільнень контактора, знос контактів вибірника, механічний знос пристрою РПН, пошкодження кінематики привода; знос резинових ущільнень дверей привода [1, 2].

Необхідність своєчасного виявлення дефектів такого важливого для трансформатора вузла, яким є пристрій РПН спонукає до проведення профілактичних заходів залежно від стану РПН.

Разом з тим, задача діагностування технічного стану пристроїв РПН трансформатора значно ускладнюється неповнотою та дискретністю даних про його стан. Неповнота інформації про параметри технічного стану РПН трансформатора зумовлена періодичним характером вимірювань параметрів, які змінюються безперервно.

Проведений аналіз параметрів технічного стану пристроїв РПН показав, що найбільш інформативними з них, які дозволяють діагностувати поточний технічний стан визначаються з таких груп вимірювань [1, 2, 3]; аналіз проб масла з контактора пристроїв РПН для визначення метолом хроматографії концентрації розчинених діагностичних газів в маслі контактора - окис вуглецю  $CO$ , вуглекислий газ  $CO_2$ , етилен  $C_2H_4$ , ацетилен  $C_2H_2$ , етан  $C_2H_6$ , тангенс діелектричних втрат в маслі контактора  $tg\delta$ , струм обертового моменту електричного двигуна привода РПН, перехідний опір контактів контактора  $R$ , вміст вологи в трансформаторному маслі контактора РПН  $W$ , величина пробивної напруги  $U_{пр}$ , кислотне число  $KOH$ .

Розроблена нечітка база знань для діагностування технічного стану РПН є складовою частиною дослідницької експертно-діагностичної системи силового трансформатора і дозволяє класифікувати такі поточні технічні стани пристроїв РПН: «Нормальна експлуатація пристроїв РПН», «Ризик експлуатації пристроїв РПН», «Аварійний стан пристроїв РПН».

Проведений аналіз існуючих способів регулювання напруги в електричних

мережах з допомогою пристроїв РПН силових трансформаторів показав, що більшість з них не враховують наявний ресурс пристроїв РПН [5, 6,7]. Реалізовані в автоматичних регуляторах пристроїв РПН силових трансформаторів закони регулювання напруги забезпечуючи достатню якість регулювання не враховують обмеження, які визначаються рівнем технічного стану» що призводить до зниження надійності їх функціонування.

На основі результатів діагностування технічного стану нечіткою моделлю визначається технічний стан пристрою РПН і формується такий режим їх експлуатації, який відповідає обмеженням на допустиму кількість перемикачів за деякий визначений термін експлуатації.

Для регулювання напруги використовується нечіткий контролер, який працює за алгоритмом Мамдані в режимі стабілізації відхилення напруги на шинах споживачів розподільчих мереж. На його вхід подаються такі параметри: розрахункове значення напруги на шинах споживачів, поточне положення відпайки РПН, швидкість змінювання напруги і максимальна кількість перемикачів за визначений термін. З виходу знімається напрямок перемикачів (вверх, вниз, нерухомо) і термін, за який це перемикач повинно бути закінчено.

На рис.1 представлена схема системи для якої виконувались тестові дослідження регулювання напруги на шинах споживача.

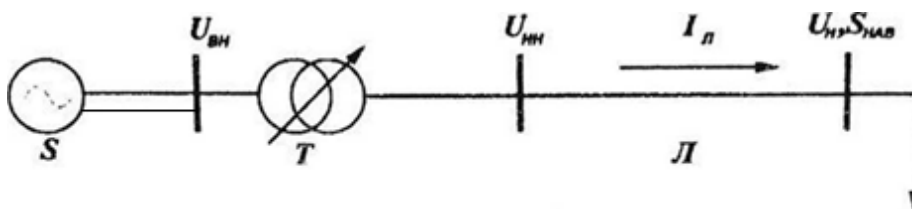


Рисунок 1 – Схема системи для дослідження регулювання напруги

При цьому в алгоритмі реалізовані такі принципи: в процесі регулювання напругу споживача потрібно підтримувати в межах нормованих ДСТУ; пристрої РПН не повинні реагувати на короточасні зниження напруги (КЗ, запуск потужних двигунів і інш.); кількість перемикачів повинна не перевищувати допустиму.

На вхід нечіткого контролера (рис. 2), також надходить такі змінні параметри: поточне положення відпайки положення РПН, гранична кількість перемикачів за визначений термін (наприклад, за добу), що визначається рівнем технічного стану РПН, похідна від змінення діючої напруги у вузлі навантаження.

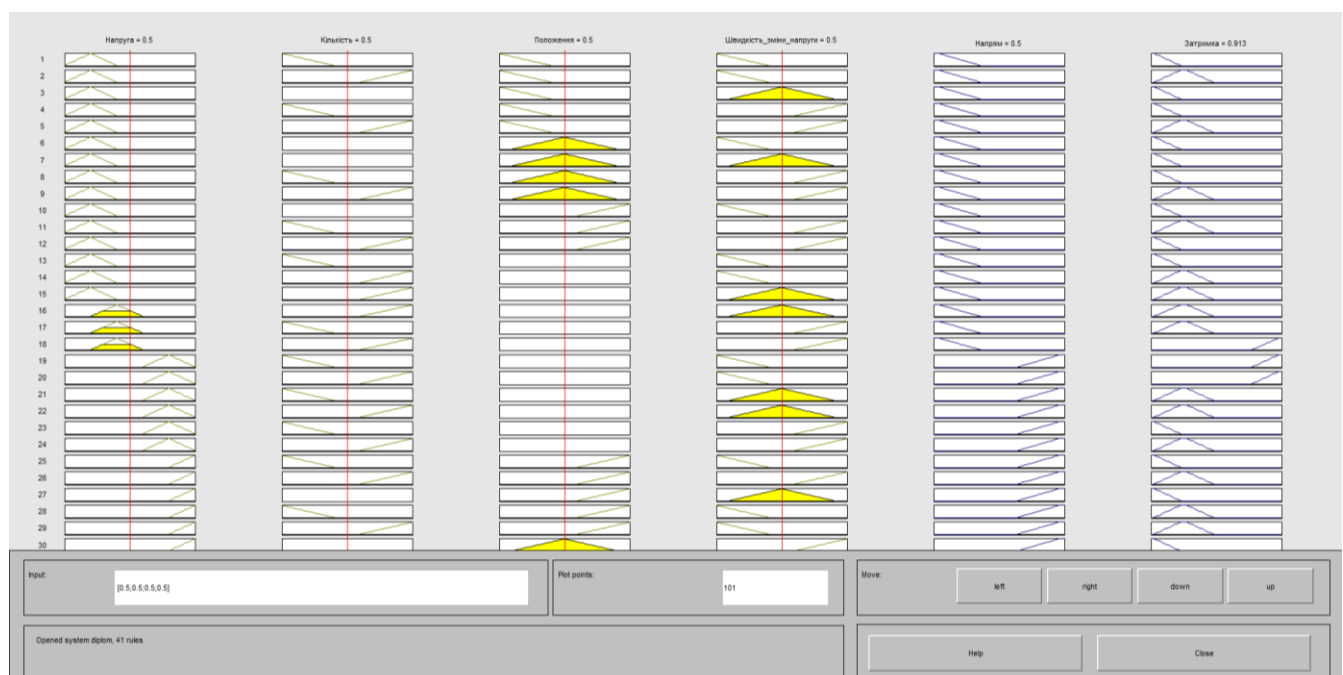


Рисунок 2 –Правила нечіткого логічного висновку Мамдані

Перелік термів вхідних і вихідних лінгвістичних змінних регулятора напруги наведено нижче.

**Напруга** – напруга на шинах навантаження. Терми лінгвістичної змінної «Напруга» показані на рис. 3а.

«Нормальна» ( $T_N^U$ ) – трапецієдальна функція належності; «Нижча за норму» ( $T_{\text{нн}}^U$ ) – трапецієдальна; «Низька» ( $T_{\text{н}}^U$ ) – трапецієдальна функція; «Дуже низька» ( $T_A^U$ ) –  $z$ -подібна функція належності; «Вища за норму» ( $T_{\text{вн}}^U$ ) – трапецієдальна; «Висока» ( $T_{\text{в}}^U$ ) –  $S$ -подібна функція належності;

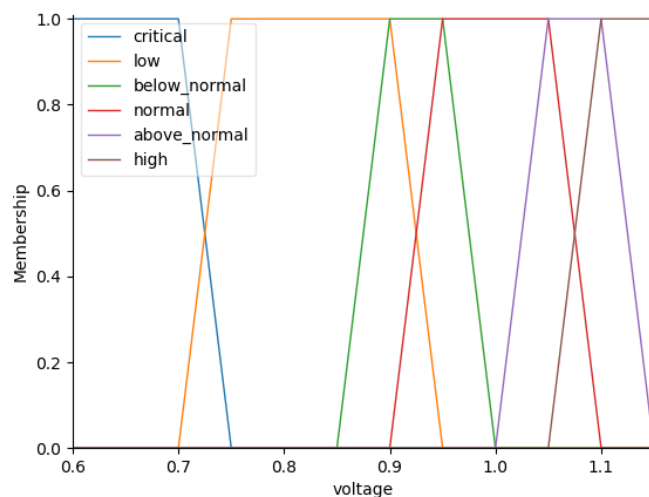


Рисунок 3а – Напруга на шинах споживача

**Кількість перемикачів.** – кількість перемикачів, зроблених пристроєм РПН за добу, або за інший термін, терми лінгвістичної змінної «Кількість перемикачів за добу» показані на рис. 3б.

«Не велика» ( $T_{\text{нв}}^n$ ) –  $z$ -подібна функція належності; «Середня» ( $T_{\text{ср}}^U$ ) – трапецієдальна функція; «Велика» ( $T_{\text{в}}^n$ ) –  $S$ -подібна функція;

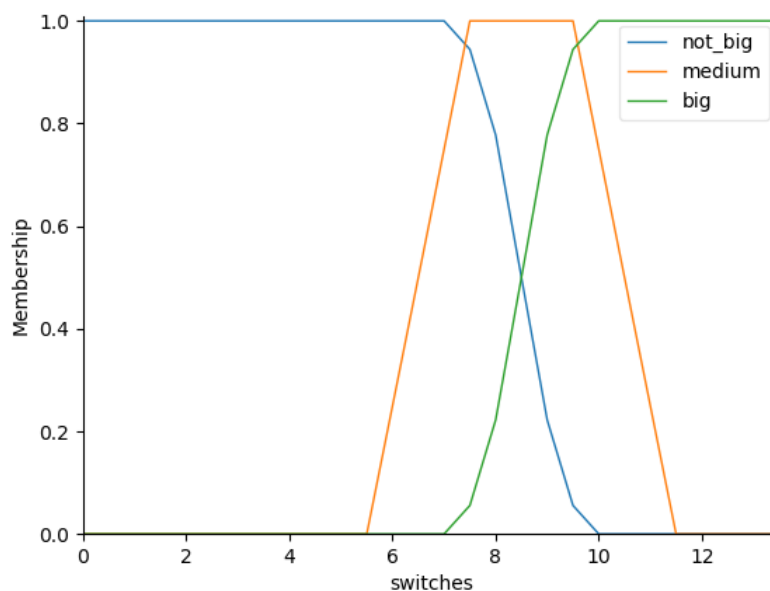


Рисунок 3б – Кількість перемикачів

**Положення відгалужень РПН** – поточне положення відгалужень РПН. Терми лінгвістичної змінної показані на рис. 3в.

«Нижче за середнє» ( $T_{\text{нс}}^{\text{рпн}}$ ) –  $z$ -подібна функція належності; «Середнє» ( $T_{\text{с}}^{\text{рпн}}$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Вище за середнє» ( $T_{\text{вс}}^{\text{рпн}}$ ) –  $S$ -подібна функція належності;

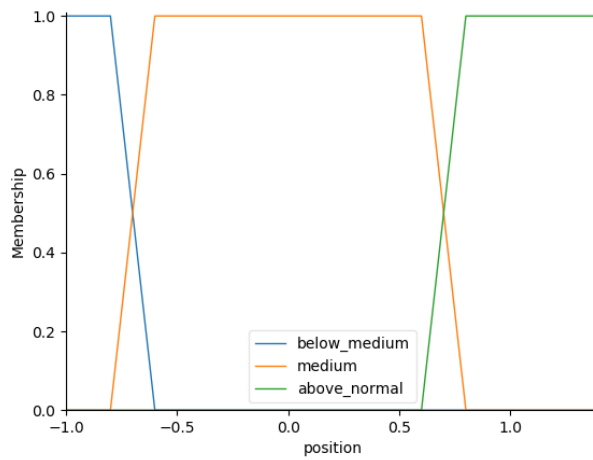


Рисунок 3в – Положення відгалужень РПН

**Швидкість змінення напруги** – похідна від змінення напруги. Терми лінгвістичної змінної «Швидкість змінення напруги» показані на рис. 3г. «Від’ємна» ( $T_v^{dU}$ )  $z$ - подібна функція приналежності; «Нульова» ( $T_0^{dU}$ ) – трикутна функція приналежності; «Додатна» ( $T_D^{dU}$ ) -  $S$ - подібна функція належності;

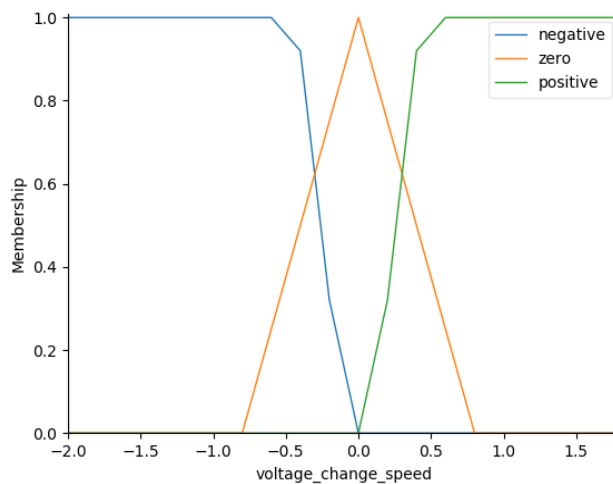


Рисунок 3г – Швидкість змінення напруги

**Напрямок переключення** – напрямок наступного переключення РПН. Терми лінгвістичної змінної «Напрямок переключення» показані на рис. 3д. «Вгору» ( $T_{UP}$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Вниз» ( $T_{DW}$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Нерухомо» ( $T_{ST}$ ) – трапецієдальна функція приналежності;

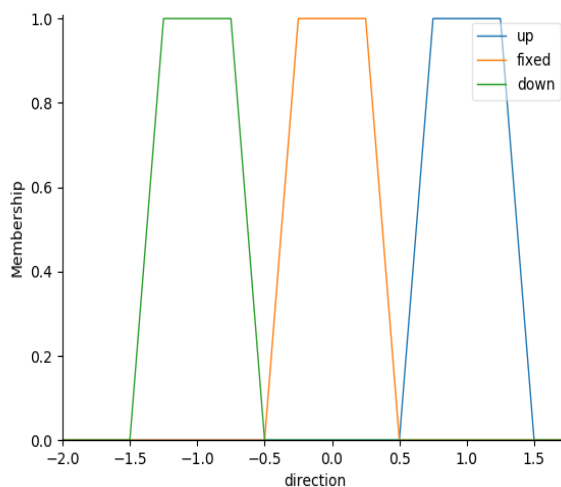


Рисунок 3д – Напрямок переключення

**Затримка переключення** – затримка наступного переключення РПН. Терми лінгвістичної змінної «Затримка переключення» показані на рис. 3е. «Мала» ( $T_M^r$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Нижча за середнє» ( $T_{nc}^r$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Середня» ( $T_c^r$ ) – трапецієдальна функція приналежності; «Велика» ( $T_B^r$ ) – трапецієдальна функція приналежності;

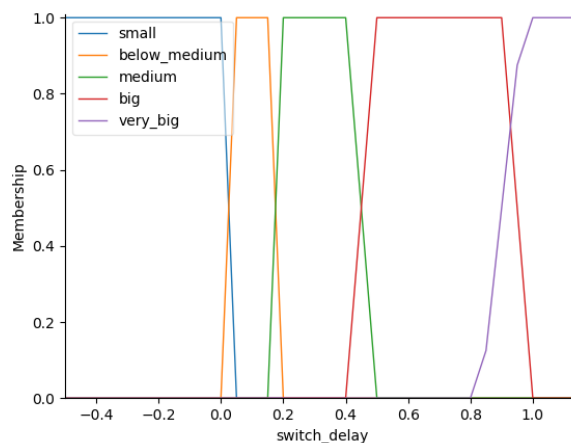


Рисунок 3е – Затримка переключення

Напруга на шинах споживача, яка змінюється при змінюванні навантаження і дія пристрою РПН трансформатора підтримується в нормальних межах, визначається з рівняння згідно з яким реалізується принцип зустрічного регулювання

$$U_H = U_{2T} - I_{Л2} \cdot z_{Л2},$$

де  $U_H$  - величина напруги у споживача;  $U_{2T}$  - величина напруги на вторинній обмотці трансформатора;  $I_{Л2}, z_{Л2}$  - величини струму і опору лінії Л2.

В залежності від величини напруги  $U_H$ , яка подається на вхід нечіткого регулятора, приймається рішення про перемикання пристроїв РПН в ту чи іншу сторону.

Для вищенаведених змінних було складено 40 правил нечіткого логічного висновку для даної системи. Фрагмент бази правил при використанні відповідних термів лінгвістичних вхідних і вихідних змінних має вигляд:

1. Якщо  $(C_1 = T_H^u), I(C_2 = T_{HB}^n), I(C_3 = T_{nc}^{рпн}), I(C_4 = T_v^{dU})$  ТО  $(C_5 = T_{DW}), I(C_6 = T_{DK}^t)$
2. Якщо  $(C_1 = T_H^u), I(C_2 = T_B^n), I(C_3 = T_{nc}^{рпн}), I(C_4 = T_v^{dU})$  ТО  $(C_5 = T_{DW}), I(C_6 = T_K^t)$
- ...
35. Якщо  $(C_1 = T_A^u)$  ТО  $(C_5 = T_{ST}), I(C_6 = T_{DT}^t)$

З використанням вищеописаної нечіткої моделі і програми діагностування технічного стану і регулювання напруги пристроїв РПН силових трансформаторів були проведені тестові розрахунки процесів регулювання напруги у вузлі навантаження при різних графіках змінювання повної потужності споживачів і рівнях технічного стану пристроїв РПН. На рис. 4 представлені графіки змінювання напруги  $S_{ном}$  і перемикань  $N$  пристроїв РПН для заданого на рис. 4а графіка змінювання навантаження у вузлі.

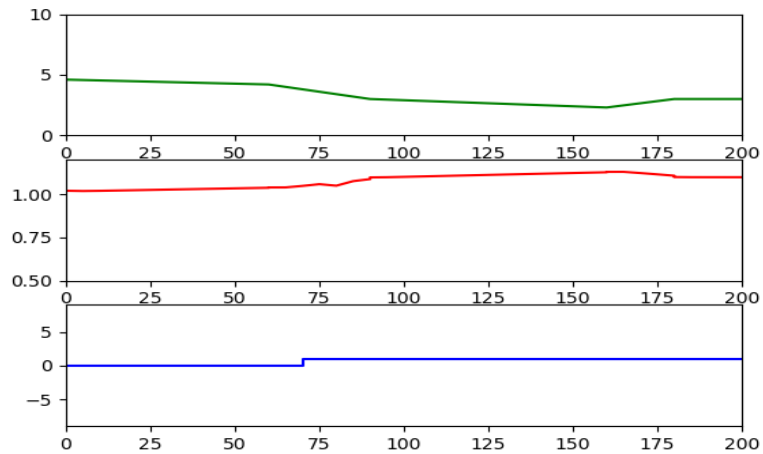


Рисунок 4 – Графіки змінювання навантаження (а), напруги (б), кількості перемикачів (в)

З представлених на рис. 4 (а-в) графіків видно, що традиційний і нечіткій регулятор забезпечують при змінюванні навантаження стабілізацію напруги у вузлі навантаження, але нечіткій регулятор, враховуючи обмеження на кількість перемикачів пристроїв РПН в залежності від їх технічного стану здійснює меншу кількість перемикачів.

#### **Висновок:**

1. Пристрої РПН сучасних силових трансформаторів є достатньо ненадійними з обмеженим ресурсом елементами, що часто спричиняє їх відмови.
2. Для забезпечення необхідної надійності функціонування пристроїв РПН необхідна розробка ефективних методів, моделей і відповідного програмного забезпечення для діагностування технічного стану та регулювання напруги.
3. Розроблено нечітку модель і алгоритм регулювання напруги у вузлі навантаження ЕЕС.
4. Для виключення передчасного зносу пристроїв РПН необхідно введення в регулятор в залежності від технічного стану пристроїв обмежень на кількість перемикачів.
5. Використання нечітких алгоритмів регулювання напруги є більш ефективним в порівнянні з класичним, оскільки забезпечується якість напруги за меншої кількості перемикачів(збільшується ресурс пристроїв РПН).

#### **Перелік посилань**

1. В.В Грабко. Моделі та засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН. - Вінниця УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005,-109с
2. Порудоминский В В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. - изд 2-е, перераб. и справ. - М «Энергия», 1974-288с.
3. Рэнси Р. Трансформаторы с переключением под нагрузкой/Мировая энергетика -1996.- №4.
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB FuzzyTECH-СПб.: БХВ-Петербург, 2005 -736с.
5. Мокін Б.І., Грабко В.В., Львов Ш.Ю Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в електричних мережах// Проблеми створення нових машин і технологій. Сборник научных трудов Кременчугского государственного университета, выш.2. - Кременчук КГПИ - 1999 – с143-146.
6. Yan-Yih Hu, Feng-Chang Lu. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation/IEEE transaction on Power Systems, Volum 13, November 1998. Page(s); 1265-1271.
7. Feng-Chang Lu, Yan-Yih Hu. Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. //IEEE transaction on Power Systems, Volum 12, May 1997. Page(s); 681-687.