

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-2>

УДК 621.311.1.004.18

К. В. Демченко¹, канд. техн. наукО. М. Піскарьов², канд. техн. наукА. О. Панов¹, аспірантС. В. Галько³, канд. техн. наукА. І. Середа¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3168-5351

ORCID: 0000-0002-6980-984X

ORCID: 0000-0002-0688-1430

ORCID: 0000-0001-7991-0311

ORCID: 0000-0002-7670-6822

¹Державний біотехнологічний університет, м. Харків²Харківський національний університет радіоелектроніки³Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного

e-mail: uyaska31@gmail.com

ПІДТРИМАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація. Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2030 р., серед напрямів підвищення ефективності енергетичного сектору країни визначено контроль якості електроенергії для споживачів та регулювання напруги і показників якості електроенергії для досягнення стандартів якості. Для завдання нормалізації якості напруги в мережі запропоновано модель регулювання сталого відхилення напруги за допомогою нечіткої логіки, і на основі моделювання показано ефективність запропонованих алгоритмів. Алгоритм управління засновано на нечіткій логіці та розглядається як альтернатива переходу від аналогового управління до цифрової системи управління перемикачем відгалужень обмотки. Результати роботи можуть бути використані під час проектування підстанції для впровадження в енергосистему.

Ключові слова: розподільна мережа, алгоритм управління, набори термінів, якість електроенергії, додаткове навантаження.

Постановка проблеми. Однією з важливих вимог до електропостачання є забезпечення якості електроенергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим стандартам. Відхилення напруги та інших показників якості від установлених стандартів істотно впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, призводячи до економічного збитку. Тому однією з важливих і актуальних енергетичних проблем в Україні та в усьому світі є нормалізація показників якості електроенергії. За умови дотримання встановлених стандартів якості електроенергії забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та електричних мереж споживачів електричної енергії. Відхилення напруги від номінальних значень відбуваються внаслідок добових, сезонних і технологічних змін електричного навантаження споживачів, зміни потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистеми, зміни схеми і параметрів електричних мереж. Якість поставленої електроенергії, як і якість інших товарів та послуг, важко визначити та кількісно оцінити. Не існує одного прийнятого визначення якісної електроенергії. Якість переважно визначається якістю форми сигналу напруги, оскільки неможливо контролювати струми, що споживаються навантаженнями замовника. Якість напруги є не тільки відповідальністю оператора мережі, а й у певному відношенні залежить від виробників і споживачів [1]. ДСТУ EN 50160:2014 нормується відхилення напруги на клеммах приймачів електричної енергії [2]. Відповідно до цього стандарту, нормально допустимі і гранично допустимі значення відхилення напруги повинні дорівнювати $\pm 5\%$ і $\pm 10\%$ від номінального значення напруги в точках спільного приєднання споживачів електричної енергії

і повинні встановлюватися в договорах енергопостачання у години мінімального і максимального навантаження в енергосистемі з урахуванням необхідності дотримання норм стандарту на виводах приймачів електроустановок відповідно до нормативних документів.

Аналіз останніх досліджень. Для регулювання змінної напруги на виході з трансформатора використовується пристрій, у якому напівпровідникові силові ключі перемикають відводи безконтактного пристрою для зміни відгалужень обмотки [3–5]. Відомий також пристрій для перемикання відгалужень регулюючої обмотки трансформатора під навантаженням, який містить два вакуумних вимикача в розвантаженні з тиристорним включенням і контакторами [6–9]. Аналогічний пристрій для регулювання напруги силового трансформатора з перемиканням вторинної обмотки трансформатора описано в [10; 12; 13]. У статті описано визначення допустимих діапазонів регулювання напруги за допомогою імітаційного моделювання. Пристрій перемикання відгалужень під навантаженням є елементом з обмеженим ресурсом перемикання [15; 16]. Механічні пристрої перемикання під навантаженням мають невідповідний час перемикання ≥ 5 . Безконтактні пристрої для зміни відгалужень, у яких використовуються напівпровідникові силові ключі, позбавлені цих недоліків [17–21]. Трансформатори, які оснащені такими пристроями, мають час невідповідного перемикання ≥ 10 мс, а саме перемикання не супроводжується появою більш високих гармонік, відповідно, поліпшується динамічна стійкість системи регулювання напруги [22; 23]. Пристрій додаткової напруги (ПДН) є конструктивно і функціонально закінченим пристроєм і служить для посилення живлення контактної мережі [24]. ПДН стабілізує напругу контактної мережі шляхом регулювання рівня вихідної напруги тягової підстанції залежно від поточного навантаження [25–26]. Існуючі системи управління перемикаючим пристроєм під навантаженням мають недоліки – висока вартість і обмежена кількість перемикань, що знижує якість регулювання [29–31]. Представлений у статті пристрій не захищає ключі від струмів короткого замикання, і в мережі в проміжних режимах роботи з'являються більш високі гармоніки [32–34]. Недоліком наведеного у статті методу регулювання напруги є те, що перемикання здійснюється на вторинному боці силового трансформатора, де за значної потужності струм трансформатора досягає декількох тисяч ампер [35–37]. Таким чином, кожен ключ буде складатися з декількох паралельних тиристорів, що економічно не вигідно. Для точного перемикання положень і ефективної роботи навантажувального пристрою необхідно змінити алгоритмічний складник систем управління під навантаженням [39; 40; 43].

Формулювання мети статті. Удосконалення моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- розробити алгоритм управління встановленим відхиленням вихідної напруги силового трансформатора на основі нечіткої логіки, який дає змогу підвищити ефективність пристрою перемикання відгалужень і додаткових пристроїв напруги;
- удосконалити моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки із застосуванням методу обробки та аналізу даних;
- установити взаємозв'язок між ефективністю обробки та аналізу вхідних і вихідних даних та автоматизованим регулюванням якості споживання електроенергії;
- провести порівняльний аналіз моделей обробки та аналізу даних напруги в розподільчих мережах із моделями, отриманими іншими методами.

Основна частина. Однією з основних вимог до електропостачання є забезпечення якості електричної енергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим нормам [10]. Відхилення напруги та інших показників якості від установлених норм істотно впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, призводить до економічних утрат [11]. Відповідно до встановлених стандартів якості електроенергії, забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж енергопостачальних організацій та

електричних мереж споживачів електроенергії. Відхилення напруги від номінальних значень відбувається внаслідок добових, сезонних і технологічних змін електричного навантаження споживачів, зміни потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій і на підстанціях енергосистеми, зміни ланцюга і параметрів електричних мереж [38; 41; 42]. Алгоритм управління, заснований на нечіткій логіці, розглядається як альтернатива переходу від аналогового управління до цифрової системи управління перемикачем під навантаженням. Тому алгоритм управління, заснований на нечіткій логіці, може бути використаний для регулювання усталеного відхилення напруги. Для моделювання цієї системи найкраще використовувати додаток Fuzzy Logic Toolbox, який входить до пакету програм MATLAB. Стійке відхилення напруги U_n представлено в нечіткому вигляді, тобто вхідними параметрами системи нечіткого виходу вважаються чотири нечіткі змінні, що відповідають фазним напругам і положенню перемикача навантажувального пристрою: «Фаза А», «Фаза В», «Фаза С» і «Перемикач пристрою перемикача під навантаженням». А вихідними параметрами є чотири нечіткі змінні: «Положення пристрою перемикача під навантаженням», «Відключення частини навантаження», «Включення додаткового навантаження» і «Включення пристрою додаткової напруги». Функція приналежності до усталених індикаторів напруги (рис. 1), де U_n – номінальне значення відповідного відхилення напруги; $\mu\delta U_{yL}$, $\mu\delta U_{yN}$, $\mu\delta U_{yH}$, є відповідно функцією приналежності до показників установленної нормальної, низької та високої напруги [12; 13].

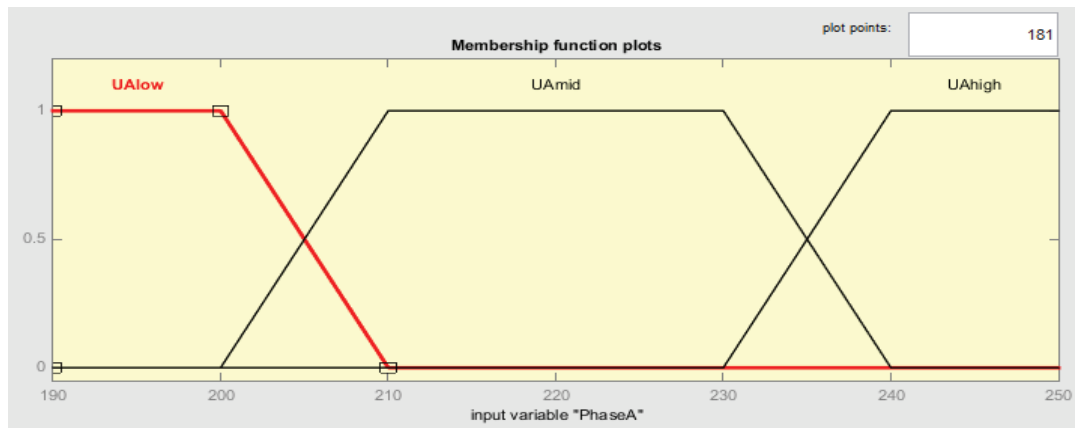


Рис. 1. Функція приналежності для усталених індикаторів напруги

Набір $T_u = \{UA_{low}, UA_{mid}, UA_{high}\}$ (рис. 2). Функції членства термів множин T_u вибираються відповідно до норм стандарту і виглядають так:

$$\mu\delta U_{yL} = \max \{0, \min \{1, \frac{0,95U_n - U}{0,05U_n}\} \}, \quad (1)$$

$$\mu\delta U_{yN} = \max \{0, \min \{1, \frac{U - 0,9U_n}{0,05U_n}, \frac{1,1U_n - U}{0,05U_n}\} \}, \quad (2)$$

$$\mu\delta U_{yH} = \max \{0, \min \{1, \frac{U - 1,05U_n}{0,05U_n}\} \}, \quad (3)$$

де $\mu\delta U_{yL}$, $\mu\delta U_{yN}$, $\mu\delta U_{yH}$ – відповідно функція приналежності до показників установленної нормальної, низької та високої напруги;

U – значення напруги в будь-який час;

U_n – номінальна напруга.

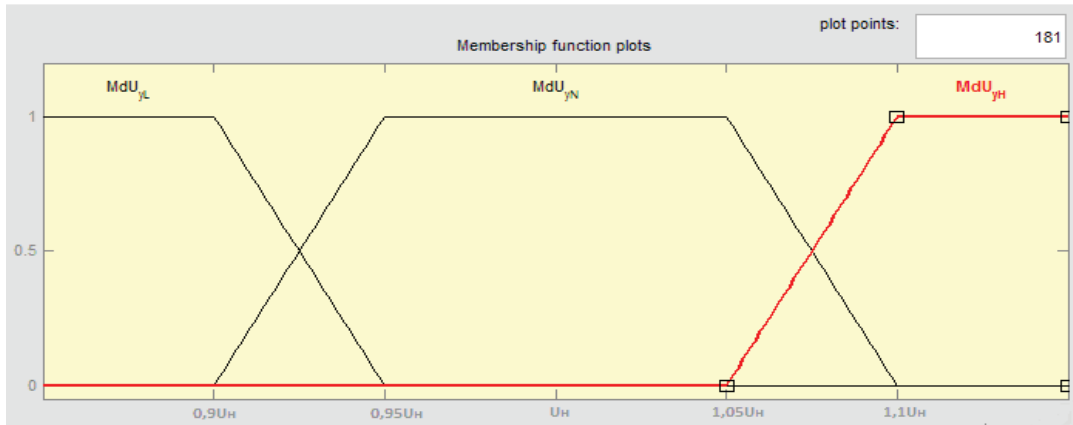


Рис. 2. Функція приналежності для вхідної змінної «Фаза А»

Набір термінів для нечіткої змінної «Фаза В» записується аналогічно «Фаза А» і використовується множина $T_u = \{UBlow, UBmid, UBhigh\}$. Аналогічно записується набір термінів для нечіткої змінної «Фаза С», де використовується набір $T_u = \{UClow, UCmid, UChigh\}$. Тобто множини $UAlow, UBlow, UClow$ є функцією приналежності встановлених показників відхилення, які описують низький ступінь відхилення від вимог норм і стандартів. Множини $UAmid, UBmid, UCmid$ є номінальними значеннями відхилення напруги, які побудовані на основі вимог стандарту IEEE та ДСТУ [2].

Множини $UAhigh, UBhigh, UChigh$ є функцією приналежності встановлених показників відхилення, які описують високий ступінь відхилення від вимог норм і стандартів. Зазначені норми регламентують як допустиме, так і максимально допустиме усталене відхилення напруги, що зручно для опису функції приналежності в трапецієподібному вигляді. По суті, функція приналежності $UAmid$ відповідає розпливчастому поняттю «ступінь задоволеності напругою нормою якості», а $UAlow, UAhigh$ характеризують ступінь відхилення напруги від норми. І множина $T_p = \{OLTC Dmin, OLTC Dmax\}$ (рис. 3).

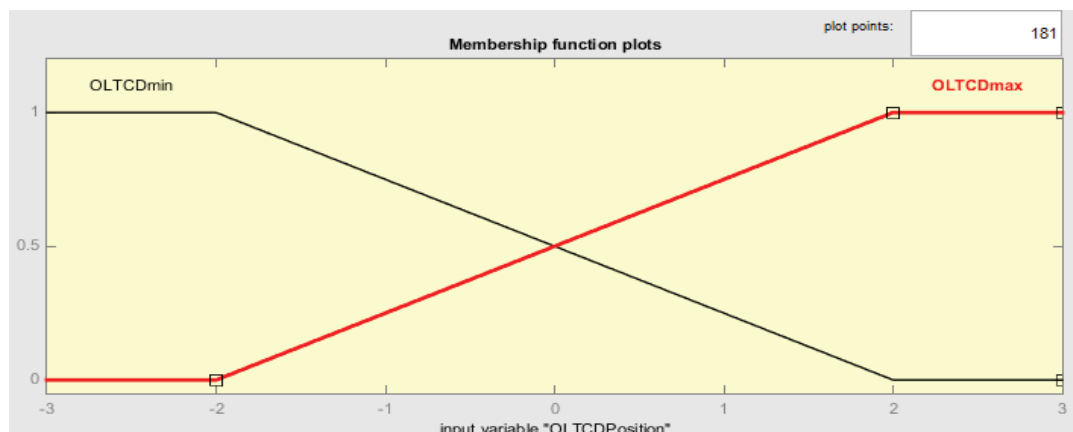


Рис. 3. Функція приналежності для умов вхідної змінної «Положення пристрою перемикавання відгалужень»

При цьому кожна з доданків перших трьох вхідних змінних оцінюється за шкалою від 190 В до 250 В, а четверта вхідна змінна оцінюється за шкалою від -3 до +3 робочих режимів перемикавання пристрою. Набір $T_n = \{OLTC D-, OLTC D+\}$ (рис. 4а) і оцінюється за шкалою від -2 до +2 перемикавання режимів роботи пристрою. Ідеться про таке вживання: збільшення (+),

зменшення (-), не змінювати (0), тобто OLTCD- – зменшення, OLTCD+ – збільшення, а 0 залишається на місці без змін. Набір термінів для нечіткої вихідної змінної «Відключення частини навантаження» використовує набір $To = \{DISABLE PARTS OF THE LOAD\}$ (рис. 4b) і оцінюється за шкалою від 0 до 200 кВт. Так само створюється набір термінів для нечіткої вихідної змінної «Включення додаткового навантаження», використовується набір $Tv = \{ON load\}$ (рис. 4c) і аналогічно оцінюється за шкалою від 200 кВт до 600 кВт. А для терміна встановленої для нечіткої вихідної змінної «Включення пристрою ПНД» встановлюється $Td = \{ON. AVD\}$ (рис. 4d) і розрахований за шкалою від 0 В до 500 В.

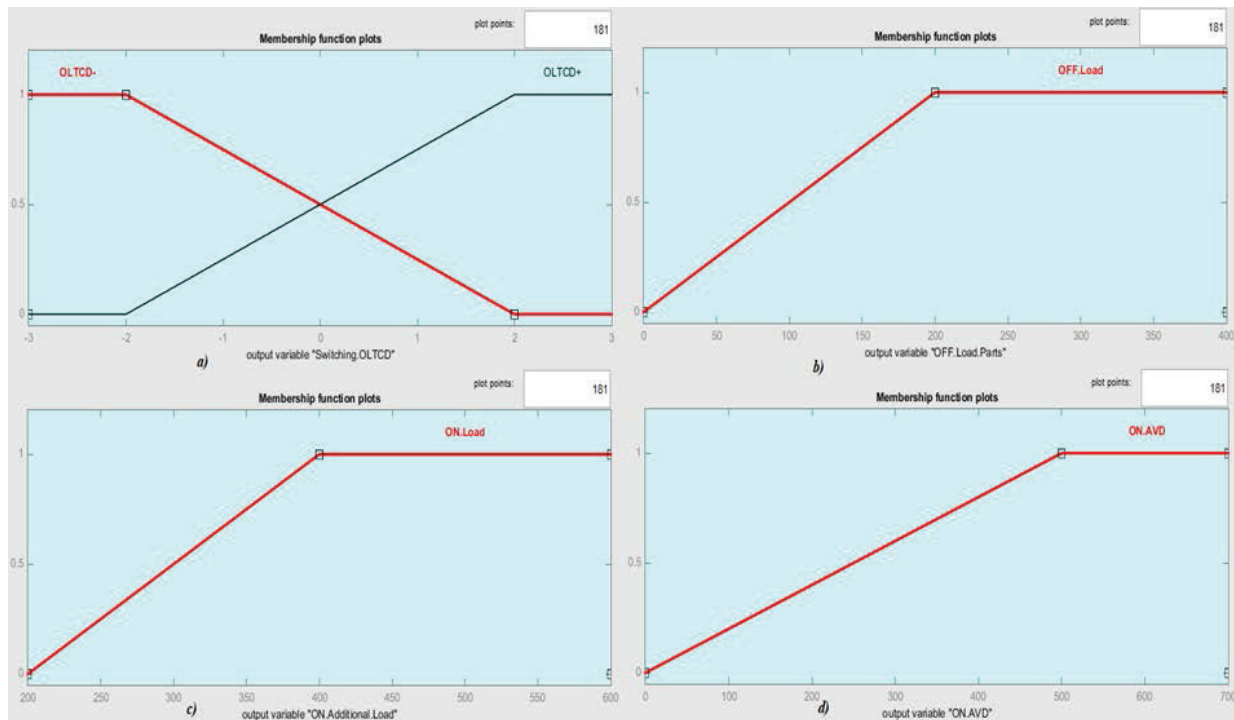


Рис. 4. Допоміжна функція для умов вихідних змінних:

- а) «Перемикання пристрою перемикання відгалужень»;**
б) «Відключення частини навантаження»; в) «Включення додаткового навантаження»;
г) «Увімкнення ПДН»

Евристичні знання із цієї проблемної сфери для нормалізації стаціонарного відхилення напруги наведені в правилах логічного висновку (представлені деякі з правил):

- 1) if $U_{A low}$ and $OLTCD_{max} \rightarrow OLTCD+$;
- 2) if $U_{B low}$ and $OLTCD_{max} \rightarrow OLTCD+$;
- 3) if $U_{C low}$ and $OLTCD_{max} \rightarrow OLTCD+$;
- 4) if $U_{A high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow OLTCD-$;
- 5) if $U_{B high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow OLTCD-$;
- 6) if $U_{C high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow OLTCD-$;
- 7) if $U_{A high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow ON load$;
- 8) if $U_{B high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow ON load$;
- 9) if $U_{C high}$ and $OLTCD_{min} \rightarrow ON load$;
- 10) if $U_{A low}$ and $U_{B high}$ and $U_{C low} \rightarrow ON AVD$;

- 11) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 12) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 13) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 14) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 15) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 16) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 17) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 18) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 19) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 20) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{low}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 21) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{high}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 22) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 23) if $U_{A\text{mid}}$ and $U_{B\text{high}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 24) if $U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;
- 25) if $U_{A\text{high}}$ and $U_{B\text{mid}}$ and $U_{C\text{mid}} \rightarrow ON\ AVD$;

Застосовувавши правила нечіткого виведення, отримаємо результат для конкретних значень вхідних змінних. Після зміни значень вхідних змінних розглядаються результати виконаних вимірювань. Оскільки процес нечіткого моделювання передбачає аналіз результатів нечіткого висновку за різних значень вхідних змінних із метою встановлення адекватності розробленої нечіткої моделі, були розроблені та розглянуті такі випадки. Розглянемо правило логічного висновку для нормалізації сталого відхилення напруги в одній із фаз «Фаза А», «Фаза В» або «Фаза С» (рис. 5), де напруга невелика, а положення пристрою перемикача під навантаженням не встановлено на максимум. Це правило було дано зверху і в повному вигляді має такий вигляд: *if* ($U_{A\text{low}}$ and $U_{B\text{low}}$ and $U_{C\text{low}}$), а не $OLTCD_{\text{max}} \rightarrow OLTCD_{+}$. На рис. 5 у першому правилі наведено значення «Фаза А» для позиції низької напруги, тобто «Фаза А» має значення 191 В, у заданих правилах логічного висновку це виглядає як $U_{A\text{low}}$, а в цей момент фази «Фаза В» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В ($U_{B\text{mid}}$, $U_{C\text{mid}}$). «Положення пристрою перемикачання» не встановлено в максимальне положення ($OLTCD_{\text{max}}$) і має значення -1,98, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого виведення рекомендує перевести перемикач в положення 1 [14; 15].

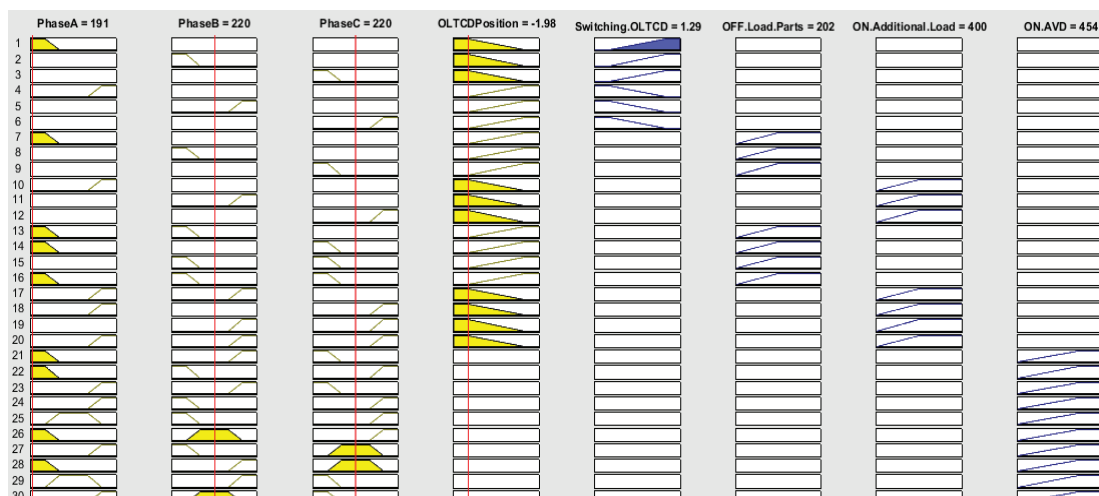


Рис. 5. Правило логічного висновку за зниження напруги однієї з трьох фаз, коли перемикач під навантаженням не на максимумі

Аналогічним чином розглянемо правило логічного висновку для нормалізації сталого відхилення напруги в одній із фаз «Фаза А», «Фаза В» або «Фаза С» (рис. 6), де напруга висока, а положення пристрою перемикача під навантаженням не встановлено на мінімум [16; 17]. Це правило в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAhigh and UBhigh and UChigh), а не OLTCDmin $\rightarrow$ OLTCD-.

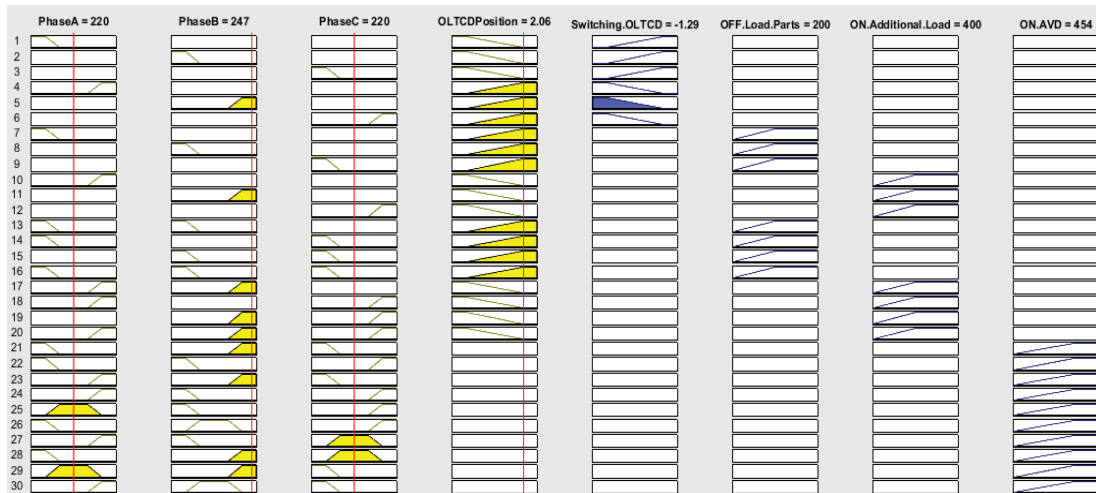


Рис. 6. Правило логічного висновку за підвищеної напруги однієї з трьох фаз, коли перемикач під навантаженням не на мінімумі

На рис. 6 у 5-му правилі значення «Фаза В» в положенні високої напруги, тобто «Фаза В» має значення 247 В, у наведених правилах логічного висновку виглядає як UBhigh, а в цей момент фази «Фаза А» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220В (UAmid, UCmid). «Положення пристрою перемикачання не встановлено в мінімальне положення» (OLTCDmin) і має значення 2,06, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого виведення рекомендує перевести перемикач під навантаженням у положення 1.

Розглянемо такий випадок (рис. 7) у 7-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 192 В (UAlow), а в цей час «Фаза В» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В (UBmid, UCmid), а «Положення пристрою перемикачання під навантаженням» вже на максимумі (OLTCDmax), і має значення 2,48, а тому розроблена система нечіткого виведення рекомендує відключати частину навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAlow and UBlow and UClow) і OLTCDmax $\rightarrow$ OFF. Parts of the Load (вимкнено частину навантаження).

Аналогічно розглянемо такий самий випадок (рис. 8) в 11-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 246 В (UBhigh), а в цей час «Фаза А» і «Фаза С» відповідають номінальному значенню напруги 220 В (UBmid, UCmid), а «Положення пристрою перемикачання» вже знаходиться на мінімальному рівні (OLTCDmin) і має значення -2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (UAhigh and UBhigh and UChigh) і OLTCDmin $\rightarrow$ ON load (під навантаженням).

Наступний випадок на рис. 9 в 13-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 192 В (UAlow) і також «Фаза В» знаходиться в положенні низької напруги 195 В (UBlow), і в цей час «Фаза С» відповідає номінальному значенню

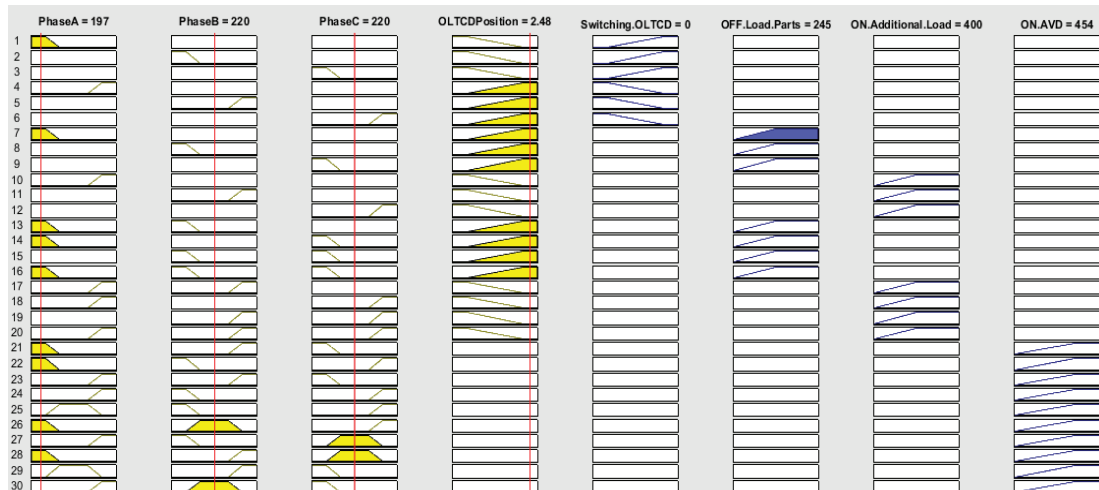


Рис. 7. Правило логічного висновку при зниженій напрузі однієї з трьох фаз при роботі перемикача на максимумі

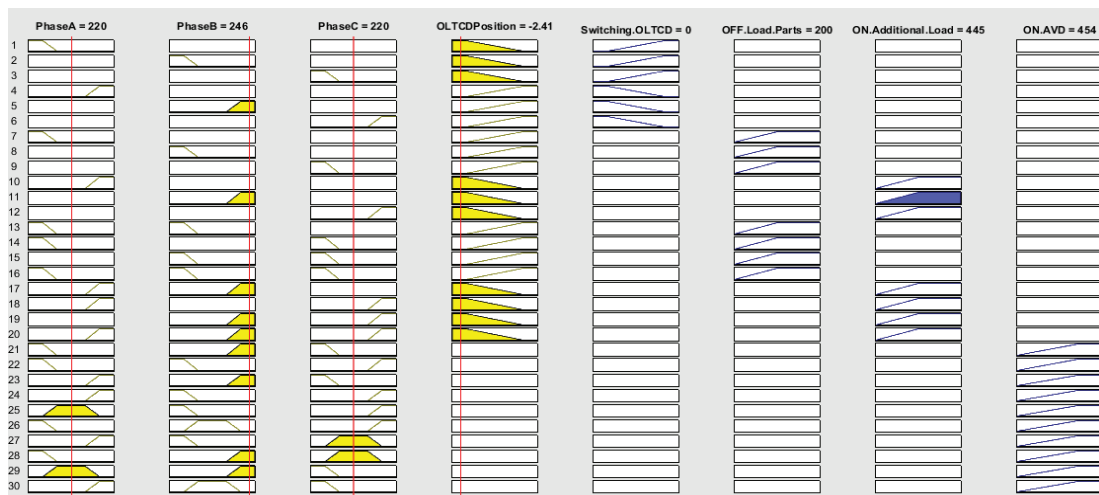


Рис. 8. Правило логічного висновку за підвищеної напруги однієї з трьох фаз під час роботи перемикача на мінімумі

напруги 220 В (U_{Cmid}), а «Положення пристрою перемикавання відгалужень» знаходиться вже на максимумі ($OLTC_{Dmax}$) і має значення 2,69, і тому розроблена система нечіткого вирахування рекомендує відключати частину навантаження до значення 245кВ. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (U_{Alow} and U_{Blow} and U_{Clow}) і (U_{Alow} and U_{Blow} and U_{Clow}) і $OLTC_{Dmax} \rightarrow$ OFF. Parts of the Load (вимкнено частину навантаження).

Наступний випадок на рис. 10 в 17-му правилі, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні високої напруги 247 В (U_{Ahigh}), і також «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 245 В (U_{Bhigh}), і в цей час «Фаза С» відповідає номінальному значенню напруги 220 В (U_{Cmid}), а «Положення пристрою перемикавання відгалужень» уже на мінімумі ($OLTC_{Dmin}$) і має значення -2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення 445 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if* (U_{Ahigh} and U_{Bhigh} and U_{Chigh}) і (U_{Ahigh} and U_{Bhigh} and U_{Chigh}) і $OLTC_{Dmin} \rightarrow$ ON load (під навантаженням).

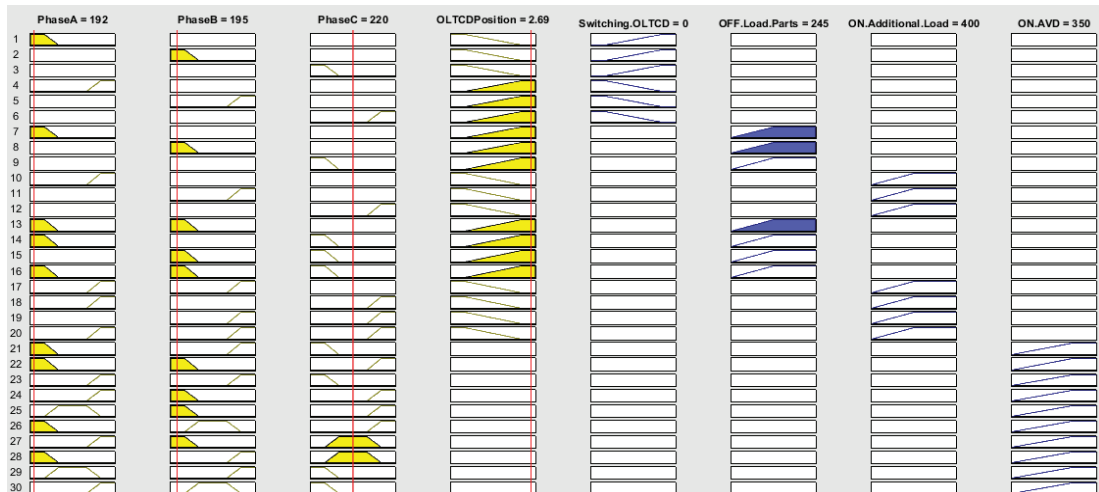


Рис. 9. Правило логічного висновку за зниженої напруги у двох фазах і однієї фази з номінальною напругою під час роботи перемикача у максимальному положенні

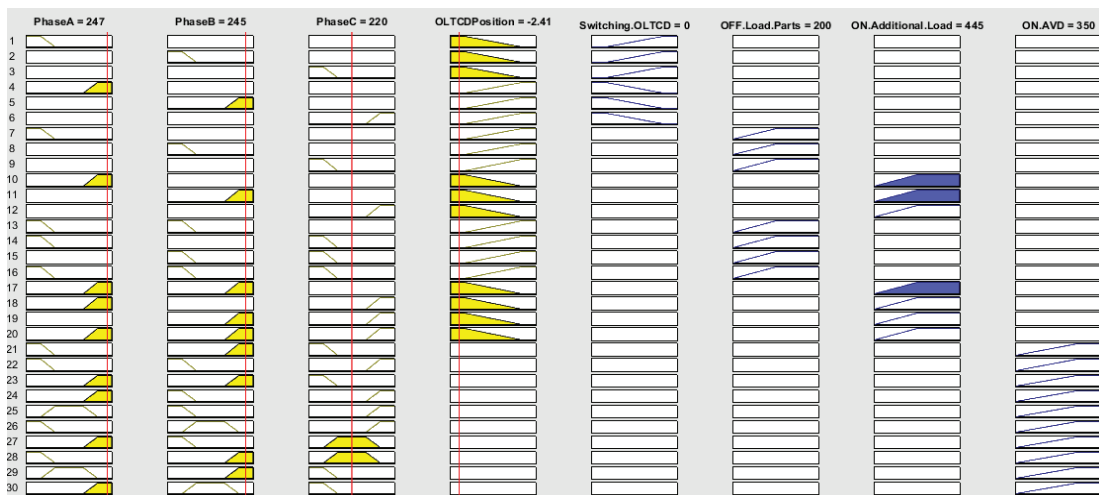


Рис. 10. Правило логічного висновку за підвищеної напруги у двох фазах і однієї фази з номінальною напругою під час роботи перемикача на мінімумі

На рис. 11 в 7-му, 8-му, 9-му, 13-му, 14-му, 15-му і 16-му правилах, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні низької напруги 193 В ($U_{A\text{low}}$), «Фаза В» знаходиться в положенні низької напруги 195 В ($U_{B\text{low}}$), і «Фаза С» також знаходиться в положенні низької напруги 195 В ($U_{C\text{low}}$), і «Положення пристрою перемикання» вже на максимумі ($OLTC_{D\text{max}}$) та має значення 2,41, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує відключати частину навантаження до значення 245 кВт. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: $\text{if } U_{A\text{low}} \text{ and } U_{B\text{low}} \text{ and } U_{C\text{low}} \text{ and } OLTC_{D\text{max}} \rightarrow \text{OFF. Parts of the Load}$ (вимкнено частину навантаження).

Аналогічно, на рис. 12 у правилах 10-му, 11-му, 12-му, 17-му, 18-му, 19-му, 20-му, де за введених значень фаз «Фаза А» знаходиться в положенні високої напруги 246 В ($U_{A\text{high}}$), «Фаза В» знаходиться в положенні високої напруги 243 В ($U_{B\text{high}}$), і «Фаза С» також знаходиться в положенні високої напруги 240 В ($U_{C\text{high}}$), а «Положення пристрою перемикання відгалужень» уже на мінімальному рівні ($OLTC_{D\text{min}}$) і має значення -2,55, у зв'язку з чим розроблена система нечіткого вирахування рекомендує включати додаткове навантаження до значення

445 кВ. Правило логічного висновку в повному вигляді має такий вигляд: *if*UAhigh *and* UBhigh *and* UChigh *and* OLTCDmin $\rightarrow$ ON (під навантаженням).

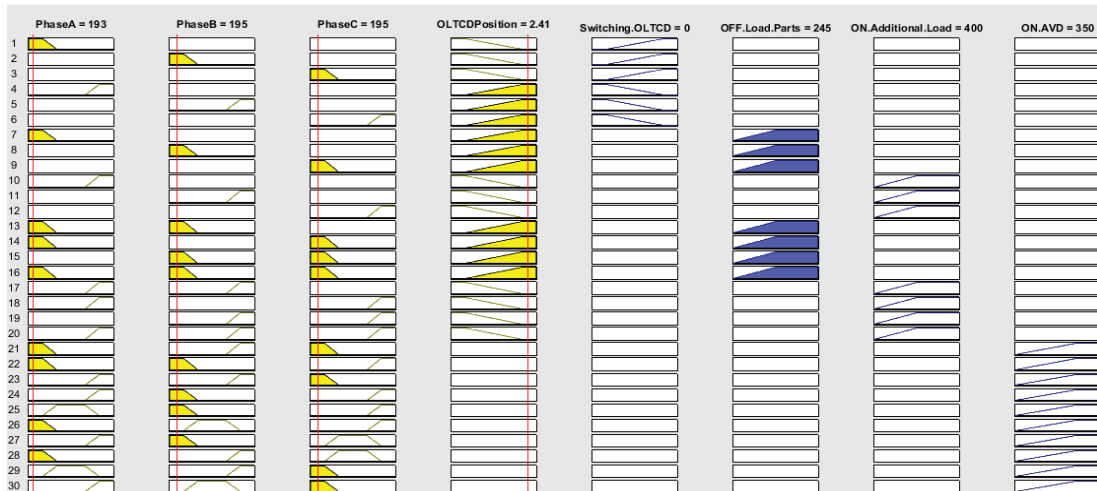


Рис. 11. Правило логічного висновку при зниженій напрузі трьох фаз одночасно і при роботі перемикача на максимумі

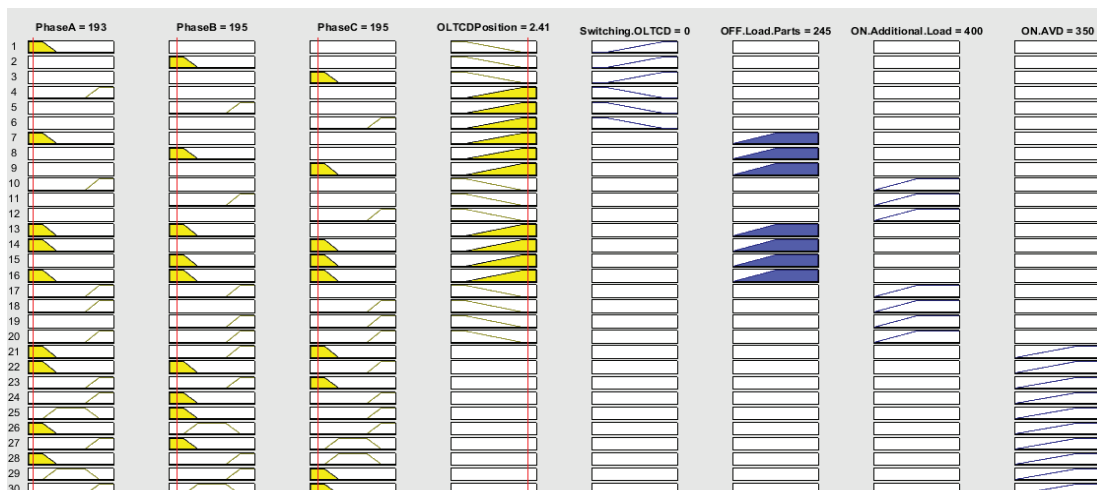


Рис. 12. Правило логічного висновку за підвищеної напруги трьох фаз одночасно і під час роботи перемикача на мінімумі

Графічний інтерфейс для перегляду нечіткої вихідної поверхні наведено на рис. 13, де видно, що за зміни напруги на одній з трьох фаз перемикач під навантаженням перейде в потрібне положення. За зміни напруги на двох фазах буде включатися додаткове навантаження або відключатися частина навантаження. А за зміни напруги на всіх трьох фазах буде включено пристрій додаткової напруги.

У деяких випадках за зміни напруги на двох або трьох фазах і спрацювання навантажувального пристрою пристрій додаткової напруги і додаткове навантаження включаються одночасно, але в деяких випадках частина навантаження відключається. Цей аналіз допомагає встановити точне регулювання напруги в одній фазі або на всіх трьох фазах мережі одночасно. Після варіювання значень вхідних змінних визначається адекватність даної розробленої нечіткої моделі. Дана модель ефективна тим, що команда управління може бути видана не за фактом

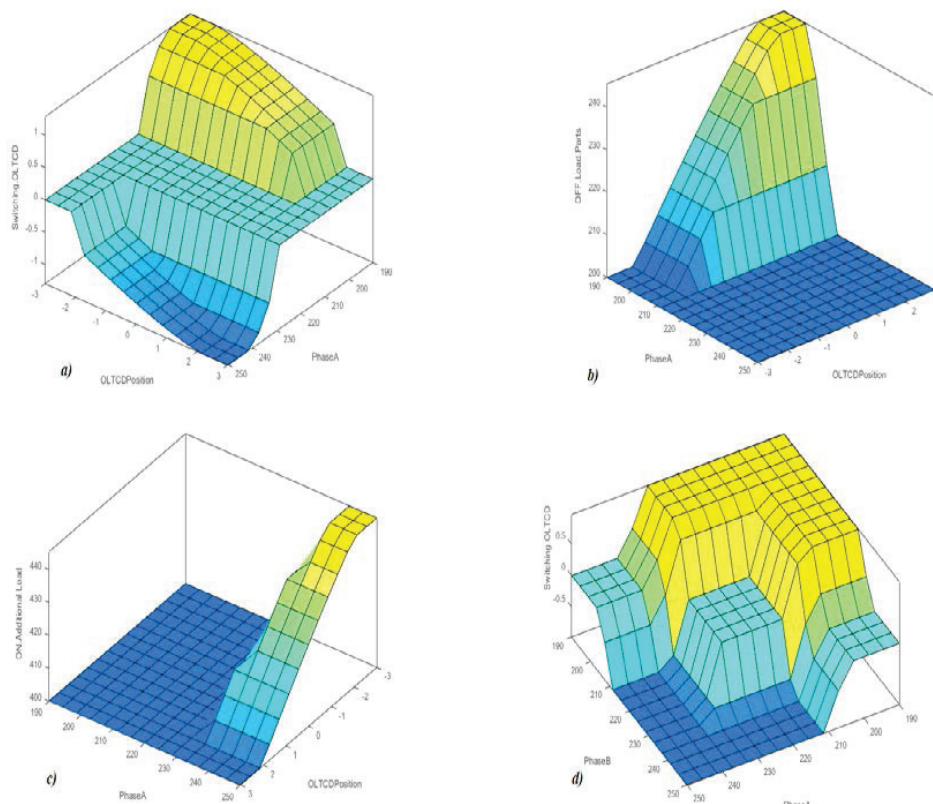


Рис. 13. Графічний інтерфейс для перегляду нечіткої вихідної поверхні для:
а) перемикавання пристроєм OLTC; б) відключення частини навантаження;
в) включення додаткового навантаження; г) включення пристрою «ПДН»

порушення норм відхилення напруги й якості електричної енергії, а заздалегідь, бо функції приналежності терм-множин перетинаються.

Висновки. Використання алгоритму управління, заснованого на нечіткій логіці, дає змогу підвищити ефективність пристрою перемикавання відгалужень і додаткових пристроїв напруги в регулюванні встановленого відхилення напруги порівняно з існуючими системами. Запропонований алгоритм досить простий у реалізації на програмованих логічних контролерах або нечітких контролерах, він може бути легко доповнений або змінений за адаптації до конкретних умов експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки. Під час отримання моделей автоматизованого регулювання якості електричної енергії були застосовані методи обробки та аналізу даних, що дало змогу виводити і бачити вхідні та вихідні дані, місця втрат напруги в мережі, які впливають на якість електричної енергії, що дало можливість підвищити адекватність моделей регулювання якості енергоспоживання. Аналітично встановлено взаємозв'язок між ефективністю обробки та аналізу вхідних і вихідних даних та автоматизованим регулюванням якості споживання електроенергії, що дало змогу провести порівняльний аналіз моделей обробки та аналізу даних напруги в розподільчих мережах із моделями, отриманими іншими методами.

Практична значимість роботи полягає у побудові моделі з використанням методу нечіткої логіки, що дає змогу прискорити узгодження трансформатора з перемикачем зі схемою управ-

ліній і встановити більш точне регулювання напруги, що підвищить ККД трансформатора і самої системи; Результати роботи можуть бути використані під час проєктування підстанції для впровадження в енергосистему.

Перспектива подальших досліджень може бути спрямована на розроблення структурних і принципових схем управління трансформаторами і створення моделей для реалізації більш детальних цілочисельних розрахунків.

Список використаних джерел

1. Tesařová M. Power quality and quality of supply. *Proceedings of the Intensive Programme 2011*. 1st ed. Pilsen: University of West Bohemia. 2011. 95–101.
2. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги живлення в електричних мережах загального призначення. Замість ДСТУ EN 50160:2010; Вхідні дані 20.05.2014. Київ : Міністерство економічного розвитку України, 2014. 32 с.
3. Feng J. Evaluating Demand Response Impacts on Capacity Credit of Renewable Distributed Generation in Smart Distribution Systems. *IEEE Access*. 2018. 6. 14307–14317. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2745198>
4. Qawaqzeh M., Dudnikov S., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Trunova I., Pazyi V., Danylchenko D., Halko S. Buinyi, R. Development of algorithm for the operation of a combined power supply system with renewable sources. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–4. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916372>
5. Fu H., Zhang X. Market Equilibrium in Active Distribution System With μ VPPs: A Coevolutionary Approach. *IEEE Access*. 2017. 5. 8194–8204. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2691316>
6. Zhou Y., Mancarella P., Mutale J. Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response. *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2016. 10(9). 2267–2276. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0458>
7. Qawaqzeh M., Al_Issa H.A., Buinyi R., Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Miroshnyk O., Nitsenko V. The assess reduction of the expected energy not-supplied to consumers in medium voltage distribution systems after installing a sectionalizer in optimal place. *Energy, Grids and Networks*. 2023. 34. 101035. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101035>
8. Assad U., Hassan M.A.S., Farooq U., Kabir A., Khan M.Z., Bukhari S.S.H., Jaffri Z.A., Oláh J., Popp J. Smart grid, Demand Response and Optimization: A Critical Review of Computational Methods. *Energies*. 2022. 15. 2003. <https://doi.org/10.3390/en15062003>
9. Perninge M., Soder L. A Stochastic Control Approach to Manage Operational Risk in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012. 27(2). 1021–1031. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2174165>
10. Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1–6. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
11. Al-Quraan T.M.A., Vovk O., Halko S., Kvitka S., Suprun O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Zayed N.M., Islam A. Energy-Saving Load Control of Induction Electric Motors for Drives of Working Machines to Reduce Thermal Wear. *Inventions*, 2022, 7(4), 92. <https://doi.org/10.3390/inventions7040092>
12. Samadi P. Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2012. 3. 1170–1180. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2203341>
13. Al-Issa H.A., Qawaqzeh M., Kurashkin S., Halko S., Kvitka S., Vovk O., Miroshnyk O. Monitoring of power transformers using thermal model and permission time of overload. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. 12(3). 2323–2334. <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i3.pp2323-2334>
14. Bondarenko L., Halko S., Matsulevych O., Tetervak I., Vershkov O., Miroshnyk O., Nitsenko V., Havrysh V. The Experimental Research on Unit Operation for Fruit Crops' Bones Calibration. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023. 13(1). 21. <https://doi.org/10.3390/app13010021>
15. Suslov K., Solonina N., Gerasimov D. Assessment of an impact of power supply participants on power quality. *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, Slovenia. 2018. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378836>

16. Komada P., Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Shchur T. The incentive scheme for maintaining or improving power supply quality. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. 95(5). 79–82. <https://doi.org/10.15199/48.2019.05.20>
17. Alghamdi B. Fuzzy Logic–Based Decentralized Voltage–Frequency Control and Inertia Control of a VSG-Based Isolated Microgrid System. *Energies*. 2022. 15. 8401. <https://doi.org/10.3390/en15228401>.
18. Tymchuk S., Miroshnyk O. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 3/4. 75. 26–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42484>
19. Farrokhhabadi M., Simpson-Porco J.W., Cañizares C.A. Optimal Design of Voltage-Frequency Controllers for Microgrids. *IEEE Madrid PowerTech*, Madrid, Spain. 2021. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PowerTech46648.2021.9495073>
20. Miroshnyk O.O., Tymchuk S.O. Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*. 2013. 4. 67–73. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84885913005&partnerID=MN8TOARS>
21. Shao K., Zheng J., Tang R., Li X., Man Z., Liang B. Barrier function based adaptive sliding mode control for uncertain systems with input saturation. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2022. 27. 4258–4268.
22. Tymchuk S., Shendryk S., Shendryk V., Panov A., Kazlauskaitė A., Levytska T. Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid. In: Lopata A., Butkienė R., Gudonienė D., Sukackė V. (eds) *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020. 1283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6
23. Rubanenko O. Hydroelectric Power Generation for Compensation Instability of Non-guaranteed Power Plants. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey. 2020. 52–56. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263151>
24. Trunova I., Miroshnyk O., Moroz O., Savchenko O., Pazyi V., Sereda A., Halko S., Buinyi R. The substantiation of reconstruction of power distribution networks objects. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week)*, Kharkiv, Ukraine. 2021. 126–131. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570107>
25. Verrelli C.M., Tomei P. Adaptive learning control for nonlinear systems: A single learning estimation scheme is enough. *Automatica*. 2023. 149. 110833.
26. Panov A.A., Tymchuk S.A. Fuzzy algorithm for regulation of steady-state voltage deviation in the 0.4 kV electrical network. *United Journa*, Tallinn. 2019. 26. 31–37.
27. Castro J.R., Saad M., Lefebvre S., Asber D., Lenoiret L. Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic. *Energies*. 2016. 9. 107. <https://doi.org/10.3390/en9020107>
28. Li Y. Command filter-based adaptive neural finite-time control for stochastic nonlinear systems with time-varying full-state constraints and asymmetric input saturation. *Syst. Sci.* 2022. 53. 199–221.
29. Lezhenkin O., Halko S., Miroshnyk O., Vershkov O., Lezhenkin I., Suprun O., Shchur T., Kruszelnicka W., Kasner R. Investigation of the separation of combed heap of winter wheat. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1781. 012016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012016>
30. Tabor S., Lezhenkin A., Halko S., Miroshnik A., Kovalyshyn S., Vershkov A., Hryhorenko O. Mathematical simulation of separating work tool technological process. *E3S Web of Conferences*. 2019. 132. 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201025>
31. Al_Issa, H.A., Qawaqzeh M., Khasawneh A., Buinyi R., Bezruchko V., Miroshnyk O. Correct Cross-Section of Cable Screen in a Medium Voltage Collector Network with Isolated Neutral of a Wind Power Plant. *Energies*. 2021. 14. 3026. <https://doi.org/10.3390/en14113026>
32. Luo R., Zhang L., Li Y. Adaptive Fuzzy Fixed-Time Control for Uncertain Nonlinear Systems with Mismatched Disturbances. *Symmetry*. 2024. 16(5). 560. <https://doi.org/10.3390/sym16050560>
33. Панов А.О. Розроблення алгоритму регулювання сталого відхилення напруги в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. Всеукр. наук.-практ. конф. випускників вищих навчальних закладів та молодих вчених. Харків : ХНАДУ, 2021. 170–174.
34. Qawaqzeh M., Miroshnyk O., Shchur T., Kasner R., Idzikowski A., Kruszelnicka W., Tomporowski A., Bałdowska-Witos P., Flizikowski J., Zawada M., Doerffer K. Research of Emergency Modes of Wind Power Plants Using Computer Simulation. *Energies*. 2021. 14(16). 4780. <https://doi.org/10.3390/en14164780>



35. Панов А.О., Тимчук С.О. Модель регулювання показників якості електроенергії в розподільчих мережах 0,4–10 кВ. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. 13–23. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2023.275897>
36. Belman-Flores J.M., Hernández-Fusilier D., García-Pabón J.J., Rodríguez-Valderrama D.A. Intelligent Control Based on Usage Habits in a Domestic Refrigerator with Variable Speed Compressor for Energy-Saving. *Clean Technologies*. 2024. 6(2). 528–550. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020028>
37. Trunova I., Miroshnyk O., Savchenko O., Moroz O. The perfection of motivational model for improvement of power supply quality with using the one-way analysis of variance. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. 6. 163–168. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/24>
38. Bazaluk O., Struchaiev N., Halko S., Miroshnyk O., Bondarenko L., Karaiev O., Nitsenko V. Ways to improve the efficiency of devices for freezing of small products. *Materials*. 2022. 15(7). 2412. <https://doi.org/10.3390/ma15072412>
39. Panov A., Tymchuk S. Fuzzy algorithm for regulation of reverse and zero sequence voltage asymmetry coefficients. *4th Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Japan: CPN Publishing Group. 2019). 670–679.
40. Khasawneh A., Qawaqzeh M., Kuchanskyy V., Rubanenko O., Miroshnyk O., Shchur T., Drechny M. Optimal Determination Method of the Transposition Steps of an Extra-High Voltage Power Transmission Line. *Energies*. 2021. 14(20). 6791. <https://doi.org/10.3390/en14206791>
41. Vovk O., Kvitka S., Halko S., Strebkov O. Energy-saving control of asynchronous electric motors of driving working machines. *Modern Development Paths of Agricultural Production: Trends and Innovations*. Cham: Springer International Publishing. 2019. 415–423. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14918-5_43
42. Wu J., Cui P. Cooperative Adaptive Fuzzy Control for the Synchronization of Nonlinear Multi-Agent Systems under Input Saturation. *Mathematics*. 12(10). (2024). 1426. <https://doi.org/10.3390/math12101426>
43. Chen C.L.P., Ren C.E., Du T. Fuzzy observed-based adaptive consensus tracking control for second-order multiagent systems with heterogeneous nonlinear dynamics. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 2015. 24. 906–915.

Стаття надійшла до редакції 06.04.2025

K. Demchenko¹, O. Piskarev², A. Panov¹, S. Halko³, A. Sereda¹

¹State Biotechnological University

²Kharkiv National University of Radio Electronics

³Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University

MAINTAINING THE QUALITY OF ELECTRICITY FOR CONSUMERS WITH THE HELP OF FUZZY LOGIC

Summary

In accordance with the Energy Strategy of Ukraine in the period up to 2030, among the directions for increasing the efficiency of the country's energy sector, the control of the quality of electricity for consumers and the regulation of voltage and indicators of the quality of electricity to achieve quality standards have been announced. It is known that in the sockets of the population of Ukraine there can be any voltage, and not the promised 220 Volt. Control of this power quality indicator should be performed by the supplier. Why does it turn out that the electric current becomes of poor quality and leads to emergency consequences. The reasons are many and can be various, and in this most often, but not to blame, the companies that supply electricity are to blame. Drops in network voltage, which can cause any consumer equipment to burn out. Power outages are an unpredictable phenomenon, they have existed and will always exist, as they depend on natural factors. However, voltage drops in the network can be regulated in the future, and consumers will be able to receive high-quality electricity. As a result of the load change, the voltage loss in the network also changes, and as a result, the voltage at the consumers' terminals changes. These changes can be fast and short-term (for example, during the start of an asynchronous motor with a short-circuited rotor) or slow and long-lasting (with a gradual change in load over the course of a day or year and with smooth voltage regulation).



Therefore, a model of regulation of steady-state voltage deviation using fuzzy logic was proposed for the problem of normalizing voltage quality in the network. And on the basis of simulation, the effectiveness of the proposed algorithms is shown. A control algorithm based on fuzzy logic is considered as an alternative to the transition from analog control to a digital on-load tap-changer control system. Modeling of this system was carried out in the Fuzzy Logic Toolbox, included in the MATLAB package. Four fuzzy variables corresponding to phase voltages are considered as input parameters of the fuzzy output system: «Phase A», «Phase B», «Phase C» and «On-load tap-changer position», and four fuzzy variables are considered as output parameters: «Device switching», «On-load tap-changer», «Disconnecting part of the load», «Switching on an additional load» and «Switching on the additional voltage device». The results of this work can be used by electricity supply companies or individual users who plan to normalize the voltage quality in their electrical network.

Keywords: distribution network, control algorithm, time sets, power quality, additional load.