УДК 621.314:621.316.17

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ КОМПЕНСАЦІЇ ФАКТОРІВ СТАРІННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

НОЗДРЕНКОВ В.С. канд. техн. наук, доцент, інженер-програміст Codeminders/Tristero Consulting, Київ, Україна, e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0579-682;

ДЯГОВЧЕНКО І. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Сумського державного університету, Суми, Україна, e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8575-8280;

ПЕТРОВСЬКИЙ М. В. канд. фіз. мат. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Сумського державного університету, Суми, Україна, e-mail: m.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0387-3136;

ВОЛОХІН В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна, e-mail: v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0009-0001-8000-3193;

Мета роботи. *Метою даної роботи є проведення оцінки негативних факторів, що впливають на старіння силових розподільних трансформаторів, розробка нечіткої моделі управління засобами їх компенсації та дослідження результатів застосування запропонованої моделі для різних режимів роботи електричної мережі.*

Методи дослідження. *Для реалізації системи управління режимами роботи електричної мережі був використаний математичний метод нечіткої логіки.*

Отримані результати. *В роботі представлено структуру на основі нечіткої логіки для компенсації факторів старіння розподільних трансформаторів. Було розроблено алгоритм налаштування та розроблено заходи, спрямовані на оптимізацію рівня навантаження та коефіцієнта потужності трансформатора. Розроблена модель аналізує параметри та фактори, що впливають на нормальну роботу трансформатора, і попереджає про наявність небезпечних факторів, які становлять загрозу надійності та можуть призвести до несправності. Крім того, було проаналізовано та обговорено ефективність фотоелектричних генеруючих станцій, батарей шунтових конденсаторів і систем накопичення енергії, встановлених на стороні вторинної напруги, для збереження терміну служби розподільних трансформаторів..*

Наукова новизна. *В роботі отримали подальший розвиток моделі нечіткої логіки, що використовуються для оптимізації роботи електричної мережі та компенсації факторів старіння силових розподільних трансформаторів.*

Практична цінність. *Отримані в роботі результати можуть бути використані для побудови оптимальної системи управління режимами роботи електричної мережі, яка зменшує фактори, що прискорюють старіння силових розподільних трансформаторів.*

Ключові слова: електромобілі; старіння трансформаторів; накопичення енергії; фотоелектричні системи; розподіл електроенергії; компенсація реактивної потужності.

I. ВСТУП

Обмеженість ресурсів і екологічні проблеми останніх десятиліть активно штовхають людство до відмови від використання нафти і переходу на альтернативні джерела енергії. Важливим кроком на цьому шляху має стати поступовий перехід від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння до електромобілів (ЕМ).

Однак перехід до транспортних засобів з електричним приводом приносить не тільки переваги, але й виклики, які необхідно вирішити. По-перше, глобальне споживання електроенергії в принципі зросте, тому що масова зарядка електромобілів буде додана до побутової техніки, міських і промислових об’єктів. По-друге, до щоденних піків споживання додається новий – вечірній, коли електромобілі заряджатимуться вдома та на парковках. По-третє, зросте навантаження на лінії електропередачі і трансформатори, оскільки зарядка електромобілів споживає значно більше електроенергії, ніж зви-чайна побутова техніка. У таблиці 1 наведено класифікацію зарядних станцій згідно з [1], [2]. Таким чином, лише декілька зарядних станцій дуже швидкої зарядки, що працюють одночасно, можуть призвести до значного перевантаження розподільного трансформатора і активізації факторів, що прискорюють його старіння. Силові трансформатори є одними з ключових елементів розподільних електромереж, і забезпечення їх надійності має першочергове значення. Передача та розподіл електроенергії

© Ноздренков В.С., Дяговченко І. М., Петровський М. В., Волохін В. В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-1

неможливі без використання силових трансформаторів, що вимагає правильної експлуатації та моніторингу цих електричних машин.

Таблиця 1. Категорії зарядних станцій

Тип	Потужність	Струм	Час заряджання, год
Повільний заряд	≤ 10 кВт	змінний	3-24
Нормальний заряд	від 10 кВт до 22 кВт	змінний	3-12
Швидкий заряд	від 22 кВт до 55 кВт	змінний або постійний	1-3
Дуже швидкий заряд	> 50 кВт	постійний	< 1

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Прийнято вважати, що зарядка електромобілів часто починається після повернення людей з роботи, що збігається з вечірнім піком навантаження [3]. Цей одночасний попит на освітлення, побутову техніку та зарядку електромобілів може перевантажити систему розподілу електроенергії, яка спочатку передбачалася для нижчого попиту на енергію. Протягом останніх років багато дослідників займалися питанням впливу заряджання електромобілів від електромережі на системи розподілу електроенергії та її елементи. У [3] автори оцінили вплив заряджання електромобілів на електромережу, вдома та на роботі, і повідомили про помітне збільшення навантаження на лінію приблизно на 15%. У роботі [4] показано, що робота станцій швидкої зарядки може призводити до значного підвищення температури трансформатора та скорочення терміну його служби. Вплив гармонійних спотворень струму та напруги на старіння розподільного трансформатора оцінено в [5]. Дослідження [6] показало, що гармоніки напруги можуть спричинити значне підвищення температури верхнього шару масла та втрати в сердечнику масляних трансформаторів, погіршення ізоляції обмотки. У [7] запропоновано методологію для отримання просторових і часових прогнозів попиту на заряджання та оцінки потенціалу зменшення пікових навантажень від електромобілів. У роботі [8] продемонстровано можливість подовження терміну служби трансформатора шляхом оптимального планування зарядки електромобіля. Автори [9] досліджують, чи є підсилення мережі доцільним з точки зору вартості електричної мережі з високим рівнем використання електромобілів, дійшовши висновку, що можна зменшити витрати на зарядку ЕМ за потужності трансформатора струму.

Оцінка прискорення старіння розподільних трансформаторів в результаті додаткових зарядних навантажень, доданих гібридними електромобілями, що підключаються до електромережі, наведена в [10]. В [11], [12] представлені ймовірнісні методи, керовані даними, для оцінки перевантаження та старіння трансформатора, коли це пов’язано з високим рівнем попиту на зарядку електромобілів у поєднанні з генерацією від фотоелектричної системи на даху. У [13] оцінено теплове старіння масляних трансформаторів за допомогою штучної нейронної мережі та моделювання за методом Монте-Карло. У статті [14] пропонується використовувати підхід глибокого навчання на основі нейронної мережі для прогнозування тривалості життя трансформатора. Автори [15] і [16] оцінили втрату ресурсу трансформаторів у розподільчих мережах з індивідуальними житловими будинками та великою кількістю підключених електромобілів і дослідили, як можна компенсувати фактори, що викликають старіння трансформатора за допомогою підсилення системи живлення, включаючи локальну фотоелектричну генерацію (ФЕ) та акумуляторної батареї (BESS). Результати [11], [12] показали, що наявність фотоелектричної генерації в електричних мережах із зарядними пристроями для електромобілів може зменшити старіння трансформатора, а з BESS цей позитивний ефект є ще більш значним [15], [16]. У [3], [7] вплив попиту на зарядку електромобілів досліджено лише для напруги на шині та рівнів навантаження на відгалуження. У статтях [4], [7]–[10] досліджується зношення трансформаторів, але не враховуються впливи споживачів із фотоелектричними панелями на даху або варіанти модернізації електричної мережі за допомогою блоків BESS. Ефект розподіленої генерації та технологій зберігання енергії не включено в модель старіння трансформатора в [13]. Методи, засновані на штучному інтелекті [13], [14] вимагають великої кількості даних з відомими умовами для навчання та тестування, але вони все ще суб'єктивні. Крім того, в [14] характеристичні величини, що використовуються в моделі прогнозування, були отримані з припущенням їх розподілу Вейбулла, який може бути дійсним не у всіх випадках. Для кількісного виміру невизначеностей випадкових процесів в роботах [11]–[13] використовується метод Монте-Карло. Однак точність розрахунків методом Монте-Карло сильно залежить від кількості ітерацій. Наприклад, щоб підвищити точність у 10 разів, необхідно збільшити кількість ітерацій у 100 разів. А зі збільшенням кількості ітерацій збільшується і час розрахунку [17]. У [16] моделюється лише один рівень проникнення ЕМ, тоді як розглянута частка реактивної потужності є нереально високою для житлової електромережі.

Це дослідження базується на результатах попередніх досліджень [15], [16]. Порівняно з [15], у моделювання було враховано вплив вищих гармонік і батарей шунтових конденсаторів (БК) на старіння трансформаторів, і було створено більше сценаріїв. Порівняно з [16], були розглянуті різні рівні проникнення EV, що охоплювали діапазон проникнення від

0% до 100%, і потенціал фотоелектричних установок використовувався для контролю коефіцієнта потужності (КП). Було оцінено ефективність кількох стратегій посилення електричної мережі для компенсації старіння трансформатора за різних рівнів проникнення ЕМ. Ці стратегії включають розгортання BESS, розосереджену фотоелектричну генерацію та встановлення батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності. Інструмент на основі нечіткої логіки було налаштовано для запобігання перевантаженню та перегріву масляного трансформатора, підтримуючи при цьому КП на бажаному рівні. Правила настройки налаштування можуть бути скориговані користувачем залежно від номінальної потужності, рівня напруги або конкретних умов експлуатації. Таким чином, запропонований підхід може бути застосовний для різних ділянок розподільчих мереж.

III. МЕТА РОБОТИ

Це дослідження спрямоване на оцінку негативного впливу вищезазначених факторів на старіння трансформатора та розробку нової основи для запобігання виходу з ладу трансформатора та продовження терміну служби. Досягнення технологій зберігання енергії, розподіленої генерації, компенсації реактивної потужності та нечіткої логіки будуть використані для вирішення зазначеної проблеми.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як правило, електропостачання житлових будинків у Європі здійснюється через системи електропередачі (СЕП), які підключені до розподільних трансформаторів. Тому ця робота зосереджена на впливі домашньої зарядки на розподільні трансформатори, що живлять ці СЕП. Збільшення споживання електроенергії трансформаторами, що живлять житлові будинки, оснащені електромобілями, які потребують потужних зарядних пристроїв (наприклад, 10-22 кВт) і, швидше за все, заряджаються ввечері, може збільшити навантаження на ці трансформатори, отже, прискорюється їх старіння.

Паралельно з цим продовжують зростати гармонійні спотворення в СЕП через поширення нелінійних навантажень і електронних пристроїв. Крім того, фотоелектричні системи з низькою потужністю короткого замикання можуть впливати на профіль напруги та спричиняти гармонійні спотворення напруги та струму [18], [19]. Коли нелінійні навантаження підключені до СЕП, вони, як правило, споживають нелінійні струми і, як наслідок, спотворюють напругу системи [20]. Найбільш суттєвим ефектом гармонійних спотворень всередині СЕП є підвищення температури. Крім того, гармонійні спотворення можуть негативно впливати на мікроконтролери системи, лічильники електроенергії, вимикачі та реле, викликаючи їх нестабільну роботу [21].

Місцеве введення електроенергії від фотоелектричної системи на рівні громади та від споживачів із фотоелектричними панелями на даху може допомогти уникнути перевантаження трансформатора через заряджання електромобілів. Однак, через специфічний профіль генерації (сонячні установки зазвичай роблять свій основний внесок опівдні), вплив на старіння трансформатора буде недостатнім [22].

Для більш ефективної компенсації факторів, що прискорюють старіння трансформатора, генерація ФЕ повинна поєднуватися з системами накопичення енергії з використання акумуляторної батареї [23]. Встановлення BESS є найбільш поширеним для будинків з фотоелектричними системами, що дає домовласникам можливість зберігати доступний надлишок енергії протягом дня та споживати цю енергію під час підвищеного попиту або коли немає генерації з відновлюваних джерел [24]. Також для компенсації реактивної потужності використовують батареї конденсаторів (БК).

У цій роботі були використані дані річних профілів навантаження 11 реальних житлових будинків і малого підприємства (див. рис.1). Агреговані графіки попиту на потужність від побутових і промислових споживачів агреговані на шині 0,4 кВ трансформатора. Коефіцієнт потужності (КП) кумулятивного навантаження змінюється з часом, і його вихідне середнє значення становить близько 0,73. Профіль навантаження має ранковий і вечірній максимуми.

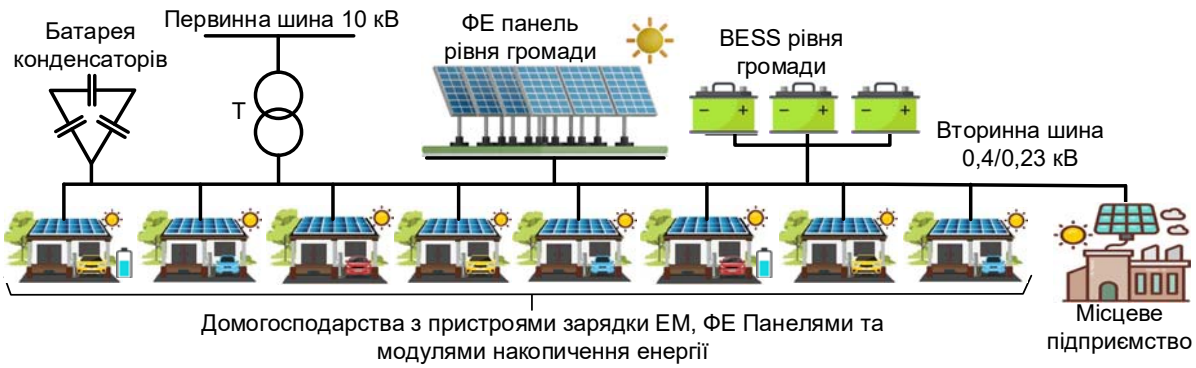


Рисунок 1. Типова схема розподільної мережі

Погодинне навантаження трансформатора на кожному t-му кроці вибірки можна розрахувати як

$$S_{T,t}^{заг} = \sqrt{(P_{спож.t} + P_{EM.t} - P_{ФЕ.t} \pm P_{BESS.t})^2 + (Q_{спож.t} - Q_{БК.t})^2}$$

де $P_{спож.t}$, $Q_{спож.t}$ активна та реактивна потужності споживачів відповідно; $P_{EM.t}$ потреба в потужності ЕМ; $P_{ФЕ.t}$ – вихідна потужність сонячних панелей; $P_{BESS.t}$ потужність BESS; $Q_{БК.t}$ – реактивна потужність БК.

Профілі навантаження та генерація ФЕ для типового літнього робочого дня в розглянутому місці показані на рис. 2. Значення на осі ординат переведено у в.о. і показано у відсотках встановленої потужності трансформатора.

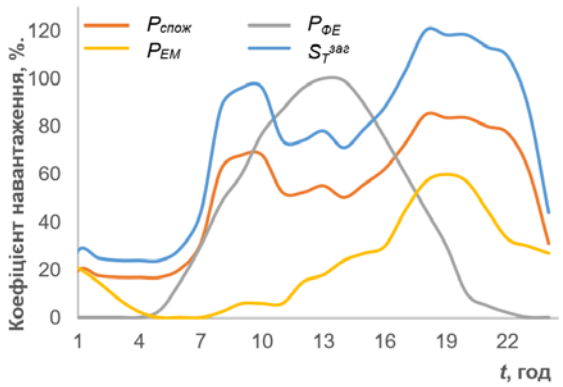


Рисунок 2. Профілі споживання розподільної мережі

Хоча профілі на рис. 2 можуть бути специфічними для Східної Європи, використана методологія є загальною і може бути прийнята в будь-якій країні чи регіоні.

В основі наведеного на рис. 3 алгоритму налаштування знаходиться нечіткий контролер.

У цій роботі розглянуті 4 сценарії роботи електричної мережі.

• Базовий сценарій. Фідер містить лише житлові та виробничі навантаження та електромобілі. Відсоток електромобілів досягає 70%, а в години підбору може досягати 60% від номінального значення трансформатора. Середній КП фідера за рік становить близько 0,73.

• Сценарій 1. На додаток до житлових і виробничих навантажень і електромобілів, у фідері встановлено фотоелектричні блоки. Останні можуть бути фотоелектричними системами на даху, автономними фотоелектричними система-ми або комунальними фотоелектричними системами, встановленими на вторинній стороні трансформатора. Встановлена потужність фотоелектричних установок становить 100% від паспортної потужності трансформатора.

• Сценарій 2. Подібний до попереднього, але з нерегульованою шунтовою батареєю конденсаторів, встановленою на вторинній шині трансформатора. Потужність КБ становить 90% реактивної потужності фідера.

• Сценарій 3. Подібний до попереднього, але з контрольованими BESS. Накопичувач енергії може бути локальним (наприклад, стаціонарний домашній накопичувач енергії) або на рівні громади, встановленим на вторинній стороні трансформатора.

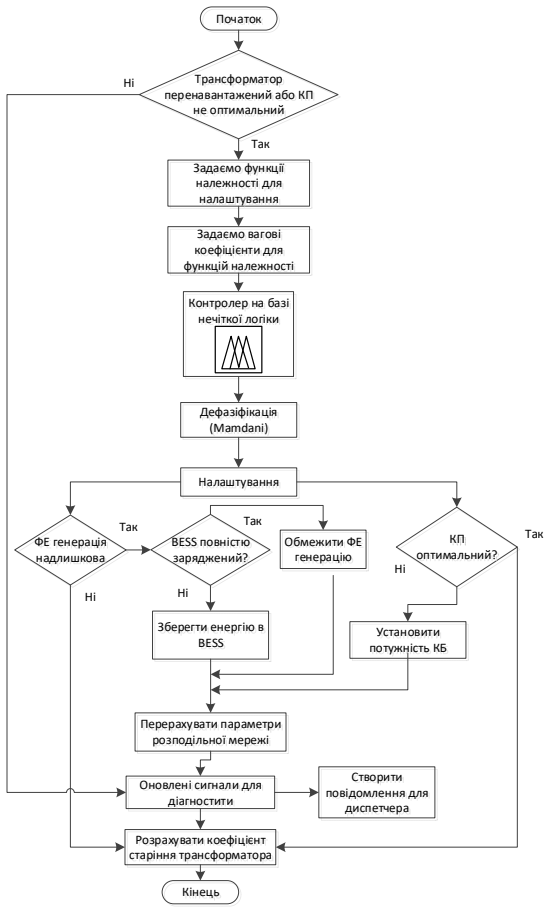


Рисунок 3. Алгоритм запропонованого нечіткого контролеру

Метою налаштування є уникнення сильного перевантаження трансформатора та підтримання КП близько 0,92, коли це можливо. Це можна реалізувати шляхом регулювання вихідної реактивної потужності БК, шляхом керування режимами зарядки та розрядки BESS, а також шляхом тимчасового припинення генерації ФЕ.

Система нечіткої логіки для налаштування показана на рис. 4. Вона має три входи, які є даними про генерацію ФЕ (PV_power), загальну повну потужність (S_power), яка залежить від потреби в енергії, і коефіцієнт потужності (cos_fi) на вторинній шині трансформатора. Кожен вхід має вбудовані функції належності.

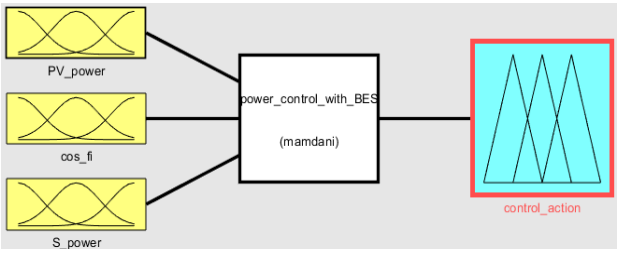


Рисунок 4. Система нечіткої логіки для налаштування

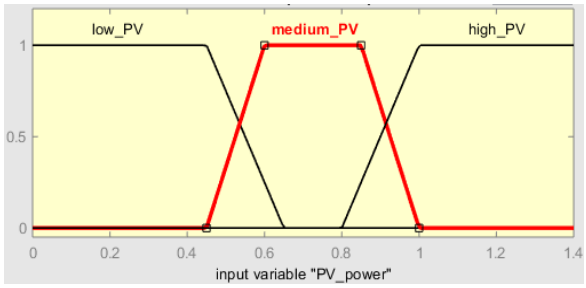
Три функції належності «PV_power» визначають генерацію ФЕ в діапазоні від 0% до 140% від номінальної потужності трансформатора як низьку, середню або високу (рис. 5а). Дві функції належності “cos_fi” визначають перехід між поганим і високим значеннями КП (рис. 5б). Дві функції належності для загального навантаження перетинаються в точці 100% номінальної потужності трансформатора (рис. 5в). Три вихідні функції належності визначають можливі реакції системи. Все від 0 до 0,5 вимагає «тонкого» налаштування, від 0,25 до 0,75 – «активного» налаштування, а від 0,75 до 1 – «інтенсивного» налаштування (рис. 5г). Залежно від вихідного значення, система може регулювати вихідну реактивну потужність КБ від 0% до 100% (один крок становить 8,33%), скорочувати до 15% доступної вихідної потужності ФЕ та перемикатися між режимами зарядки та розрядки BESS.

Правила для нечіткого алгоритму налаштування визначаються користувачем і наведені в табл. 2. Нечіткі правила налаштування

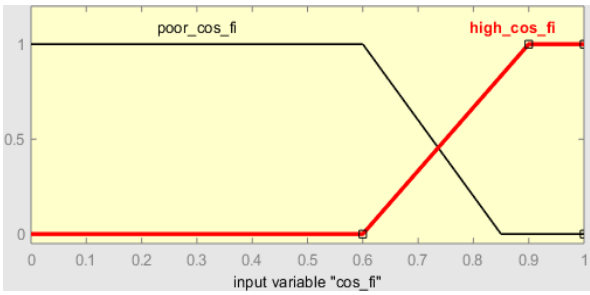
Таблиця 2. Налаштування нечіткого контролеру

IF PV_power	**OR** cos_fi	**AND** S_power	**THEN** Output
low	High	–	subtle
medium	–	–	active
high	poor	–	intense
low	–	high	intense
medium	–	high	intense
–	high	normal	subtle

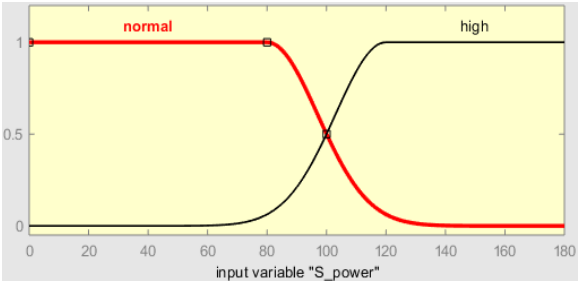
Продемонструємо ефективність налаштування запропонованого методу для компенсації факторів старіння розподільного трансформатора на прикладі того самого робочого дня при 100% використанні ЕМ. Процес налаштування можна вважати успішним, якщо тривалість роботи трансформатора в більш жорстких умовах скорочується на користь менш жорстких умов. Виходи контролерів нечіткої логіки для базового сценарію та сценарію 3 після налаштування наведені на рис. 6. Проаналізувавши рис. 6, можна зробити висновки, що налаштування дозволило скоротити тривалість найбільш різкого режиму роботи (ціле число 3 відповідає режиму «Неминучої проблеми») на користь менш несприятливого режиму «Можлива проблема» (чітке значення 2). Зазначимо, що числу 1 відповідає режим «Увага», а числу 0 режим «Немає проблеми» [25].



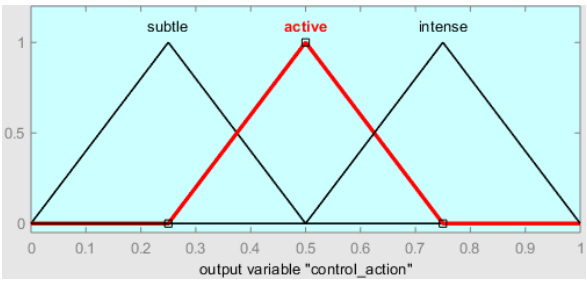
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 5. Функції належності: (а) генерація ФЕ; (б) коефіцієнт потужності; (в) загальна потужність; (г) вихід контролера нечіткої логіки

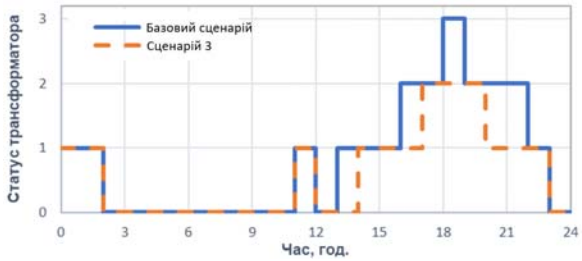


Рисунок 6. Демонстрація результатів роботи

Зміни КП протягом того одного зимового дня для різних сценаріїв зміцнення електричної мережі, за 100% кількістю ЕМ, продемонстровані на рис. 7.

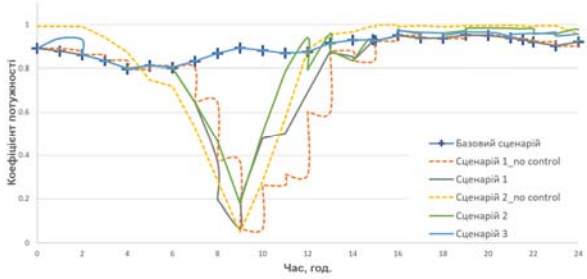


Рисунок 7. Зміна коефіцієнту потужності (КП) при 100% застосуванні ЕМ

Для базового випадку середнє значення КП становить близько 0,9. Що стосується випадку 1, з додаванням неконтрольованої генерації ФЕ, то КП падає, з особливо глибоким падінням між 7:00 і 13:00. Активація контролю ФЕ для регулювання КП може його покращити, але в часовому вікні між 7:00 і 13:00 він все ще значно нижчий за бажане значення 0,92. Дивлячись на випадок 2, з додаванням нерегульованої конденсаторної батареї КП залишається занадто низьким між 6:00 і 12:00, тоді як протягом деяких періодів часу (наприклад, з 15:00 до 2:00) він близький до одиниці. Активація нечіткого налаштування моделі для керування вихідною реактивною потужністю КБ покращує КП лише частково: він все ще далекий від бажаного значення 0,92 протягом більшої частини дня. Найкращих значень КП можна досягти у випадку 3, коли електрична мережа додатково посилена керованим BESS.

V. ВИСНОВКИ

У цьому дослідженні представлено структуру на основі нечіткої логіки для компенсації факторів, які визивають старіння трансформатора, що живить систему розподілу електроенергії з високим рівнем проникнення підключених електромобілів. Було оцінено ефективність наступних методів підсилення мережі для запобігання старіння трансформатора: фотоелектричні генеруючі блоки, батареї шунтуючих конденсаторів і системи накопичення енергії, які встановлені на стороні вторинної напруги.

Запропонований нечіткий алгоритм налаштування системи спрямований на уникнення неприйнятного перевантаження та підтримку коефіцієнта потужності поблизу бажаного рівня. Він може керувати виходом генерації ФЕ, виходом батареї шунтуючих конденсаторів і зарядкою/розрядкою BESS.

З огляду на стратегії посилення мережі, найкращі результати можна спостерігати, коли електрична мережа додатково оснащена контрольованим накопичувачем енергії, фотоелектричними установками та батареєю шунтуючих конденсаторів (тобто, випадок 3 дослідження). У цьому випадку при 100% проникненні ЕМ коефіцієнт старіння трансформатора зменшується більш ніж у 5 разів порівняно з базовим варіантом. За допомогою цієї комбінованої стратегії зміцнення мережі можна усунути вплив зростаючого попиту на зарядку електромобілів на старіння трансформатора.

Незважаючи на покращення режиму роботи трансформатора, КП для випадків 1 і 2 залишається нестабільним і часто падає нижче бажаного значення. Для випадку 3 можна підтримувати КП ближче до бажаного значення протягом дня.

Розроблений алгоритм і засіб на основі фазілогіки є універсальними і можуть бути застосовані на будь-якій ділянці електричної мережі за наявності вихідних даних на цю ділянку. У майбутній роботі слід розглянути «м'які» стратегії для покращення коефіцієнту старіння трансформаторів, які включають планування зарядки ЕМ та еластичність попиту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Falchetta G. Electric vehicle charging network in Europe: an accessibility and deployment trends analysis [Electronic resource] / Giacomo Falchetta, Michel Noussan // Transportation research part D: transport and environment. – 2021. – Vol. 94. – P. 102813. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102813 (date of access: 15.05.2024). – Title from screen.

[2] Diahovchenko I. Assessment and mitigation of the influence of rising charging demand of electric vehicles on the aging of distribution transformers [Electronic resource] / Illia Diahovchenko, Anastasiia Chuprun, Zsolt Čonka // Electric power systems research. – 2023. – Vol. 221. – P. 109455. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109455 (date of access: 12.05.2024). – Title from screen.

[3] Uncontrolled electric vehicle charging impacts on distribution electric power systems with primarily residential, commercial or industrial loads [Electronic resource] / C. Birk Jones [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14, no. 6. – P. 1688. – Mode of access: https://doi.org/10.3390/en14061688 (date of access: 11.04.2024). – Title from screen.

[4] Argade S. Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life [Electronic resource] / Sachin Argade, Visvakumar Aravinthan, Ward Jewell // 2012 IEEE international electric vehicle conference (IEVC), Greenville, SC, USA, 4–8 March 2012. – [S. l.], 2012. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/ievc.2012.6183209 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[5] Mantilla H. F. M. Aging of distribution transformers due to voltage harmonics [Electronic resource] / Harold Francisco Mazo Mantilla, Andres Pavas, Ivan Camilo Duran // 2017 IEEE workshop on power electronics and power quality applications (PEPQA), Bogota, Colombia, 31 May – 2 June 2017. – [S. l.], 2017. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/pepqa.2017.7981649 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[6] Dao T. Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers [Electronic resource] / Thinh Dao, Bao Toan Phung // IET generation, transmission & distribution. – 2018. – Vol. 12, no. 2. – P. 347–354. – Mode of access: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0498 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[7] Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load [Electronic resource] / Phillip Paevere [et al.] // Sustainability science. – 2013. – Vol. 9, no. 1. – P. 61–76. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11625-013-0235-3 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[8] Visakh A. Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of chargingand the rate of transformer aging in a residential distribution network [Electronic resource] / Arjun Visakh, M. P. Selvan // Turkish journal of electrical engineering and computer sciences. – 2022. – Vol. 30, no. 3. – P. 927–942. – Mode of access: https://doi.org/10.55730/1300-0632.3819 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[9] Should we reinforce the grid? Cost and emission optimization of electric vehicle charging under different transformer limits [Electronic resource] / N. B. G. Brinkel [et al.] // Applied energy. – 2020. – Vol. 276. – P. 115285. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115285 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[10] Nafisi H. Investigation on distribution transformer loss-of-life due to plug-in hybrid electric vehicles charging [Electronic resource] / Hamed Nafisi // International journal of ambient energy. – 2019. – P. 1–7. – Mode of access:

https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563816 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[11] Palomino A. Data-Driven risk analysis of joint electric vehicle and solar operation in distribution networks [Electronic resource] / Alejandro Palomino, Masood Parvania // IEEE open access journal of power and energy. – 2020. – Vol. 7. – P. 141–150. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/oajpe.2020.2984696 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[12] Affonso C. M. Probabilistic assessment of electric vehicle charging demand impact on residential distribution transformer aging [Electronic resource] / Carolina M. Affonso, Mladen Kezunovic // IEEE Xplore. – Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/8440211 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[13] Romero Quete A. A. Evaluación de la pérdida de vida del aislamiento solido en transformadores de potencia, estimando la historia de carga y los perfiles de temperatura ambiente por medio de redes neuronales artificiales y simulaciones de Monte Carlo [Electronic resource] / Andrés Arturo Romero Quete, Enrique Esteban Mombello, Giuseppe Rattá // Dyna. – 2016. – Vol. 83, no. 197. – P. 104. – Mode of access: https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.48134 (date of access: 12.06.2024)..

[14] A deep learning approach to the transformer life prediction considering diverse aging factors [Electronic resource] / Lanfei He [et al.] // Frontiers in energy research. – 2022. – Vol. 10. – Mode of access: https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.930093 (date of access: 12.06.2024).

[15] El-Bataway S. A. Distribution transformer's loss of life considering residential prosumers owning solar shingles, high-power fast chargers and second-generation battery energy storage [Electronic resource] / Shady A. El-Bataway, Walid G. Morsi // IEEE transactions on industrial informatics. – 2019. – Vol. 15, no. 3. – P. 1287–1297. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/tii.2018.2845416 (date of access: 12.06.2024).

[16] Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles [Electronic resource] / Illia Diahovchenko [et al.] // Results in engineering. – 2022. – P. 100592. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100592 (date of access: 12.06.2024).– Title from screen.

[17] Schreider Y. A. The Monte Carlo method: the method of statistical trials [Electronic resource] / Yu A. Schreider, G. J. Tee, Alan G. Henney // Physics today. – 1967. – Vol. 20, no. 1. – P. 129. – Mode of access: https://doi.org/10.1063/1.3034116 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[18] Shevchenko S. Y. Power quality issues in smart grids with photovoltaic power stations [Electronic resource] / Serhii Yu Shevchenko, Vitalii V. Volokhin, Illia M. Diahovchenko // Energetika. – 2018. – Vol. 63, no. 4. – Mode of access: https://doi.org/10.6001/energetika.v63i4.3623 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[19] Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks [Electronic resource] / Sebastijan Seme [et al.] // Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 1261–1266. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.088 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[20] Contemporary electric energy meters testing under simulated nonsinusoidal field conditions [Electronic resource] / Illia Diahovchenko [et al.] // Electrical engineering. – 2021. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s00202-021-01365-8 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[21] Volokhin V. V. Prospects of nanomaterials use in current and voltage hall sensors to improve the measurements accuracy and reduce the external impacts [Electronic resource] / Vitalii V. Volokhin, Illia M. Diahovchenko, Bogdan V. Derevyanko // 2017 IEEE 7th international conference "nanomaterials: application & properties" (NAP), Odessa, 10–15 September 2017. – [S. l.], 2017. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/nap.2017.8190239 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[22] Accounting for the effect of PV panel dustiness on system performance with correction for panel cleaning for matlab simulink [Electronic resource] / Sergiy Shevchenko [et al.] // 2021 IEEE 3rd ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. – [S. l.], 2021. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575747 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[23] Optimization of storage systems according to the criterion of minimizing the cost of electricity for balancing renewable energy sources [Electronic resource] / Stanislav Fedorchuk [et al.] // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. – [S. l.], 2020. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250155 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[24] Evaluation of grid-level adaptability for stationary

battery energy storage system applications in Europe [Electronic resource] / Marcus Müller [et al.] // Journal of energy storage. – 2017. – Vol. 9. – P. 1–11. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.est.2016.11.005 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[25] Beer C. Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic. Bart Kosko [Electronic resource] / Colin Beer // The quarterly review of biology. – 1995. – Vol. 70, no. 2. – P. 210. – Mode of access: https://doi.org/10.1086/418985 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

Стаття надійшла до редакції 08.05.2024

FUZZY MODEL OF COMPENSATION FOR AGING FACTORS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS

NOZDRENKOV V.S. Ph. D., Associate professor, a software developer in Codeminders/Tristero Consulting, Kyiv, Ukraine e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com. ORCID: 0009-0002-0579-6821;

DIAHOVCHENKO I.M. Ph. D., Associate professor, Associated Professor of Department of Electrical Engineering of Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0000-0001-8575-8280;

PETROVSKYI M.V. Ph. D., Associate professor, Associated Professor of Department of Electrical Engineering of Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: m.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0000-0002-0387-3136;

VOLOKHIN V.V. Ph. D., Associate professor, Associated Professor Department of Computer Engineering, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0009-0001-8000-3193;

Purpose. *This paper aims to evaluate the negative factors that affect the aging of power distribution transformers, develop a fuzzy control model for their compensation, and study the results of applying the proposed model to different modes of the electrical power network.*

Methodology. *The mathematical method of fuzzy logic was used to implement the control system of the power grid operating modes.*

Findings. *The article presents a structure based on fuzzy logic for compensating depreciation factors of distribution transformers. A tuning algorithm and measures were developed to optimize the transformer's load level and power factor. The developed model analyzes the parameters and factors affecting the normal operation of the transformer and warns of dangerous factors that threaten reliability and may lead to a malfunction. In addition, the efficiency of PV generating stations, shunt capacitor banks, and energy storage systems installed on the secondary voltage side to preserve the service life of distribution transformers was analyzed and discussed.*

Originality. *The paper further develops the fuzzy logic models used to optimize the operation of the power grid and compensate for the aging factors of power distribution transformers*

Practical value. *The results obtained in the paper can be used to build an optimal system for controlling the operation modes of the electric power grid, which reduces the factors that accelerate the aging of power distribution transformers.*

Keywords: Electric vehicle; transformer's aging; battery energy storage; photovoltaic systems; power distribution; reactive power compensation.

REFERENCES

[1] Falchetta, G., & Noussan, M. (2021). Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102813. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102813

[2] Diahovchenko, I., Chuprun, A., & Čonka, Z. (2023). Assessment and mitigation of the influence of rising charging demand of electric vehicles on the aging of distribution transformers. Electric Power Systems Research, 221, 109455. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109455

[3] Jones, C. B., Lave, M., Vining, W., & Garcia, B. M. (2021). Uncontrolled electric vehicle charging impacts on distribution electric power systems with primarily residential, commercial or industrial loads. *Energies*, 14(6), 1688. DOI: 10.3390/en14061688

[4] Argade, S., Aravinthan, V., & Jewell, W. (2012, March). Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life. *In 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference* (pp. 1-8). IEEE. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183209

[5] Mantilla, H. F. M., Pavas, A., & Durán, I. C. (2017, May). Aging of distribution transformers due to voltage harmonics. *In 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/PEPQA.2017.7981649

[6] Dao, T., & Phung, B. T. (2018). Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(2), 347-354. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0498

[7] Paevere, P., Higgins, A., Ren, Z., Horn, M., Grozev, G., & McNamara, C. (2014). Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load. *Sustainability science*, 9, 61-76. DOI: 10.1007/s11625-013-0235-3

[8] Visakh, A., & Selvan, M. P. (2022). Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of chargingand the rate of transformer aging in a residential distribution network. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(3), 927-942. DOI: 10.55730/1300-0632.3819

[9] Brinkel, N. B. G., Schram, W. L., AlSkaif, T. A., Lampropoulos, I., & Van Sark, W. G. J. H. M. (2020). Should we reinforce the grid? Cost and emission optimization of electric vehicle charging under different transformer limits. *Applied Energy*, 276, 115285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115285

[10] Nafisi, H. (2021). Investigation on distribution transformer loss-of-life due to plug-in hybrid electric vehicles charging. *International Journal of Ambient Energy*, 42(7), 744-750. DOI: 10.1080/01430750.2018.1563816

[11] Palomino, A., & Parvania, M. (2020). Data-driven risk analysis of joint electric vehicle and solar operation in distribution networks. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy,* 7, 141-150. DOI: 10.1109/OAJPE.2020.2984696

[12] Affonso, C. M., & Kezunovic, M. (2018, June). Probabilistic assessment of electric vehicle charging demand impact on residential distribution transformer aging. *In 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/PMAPS.2018.8440211

[13] Romero Quete, A. A., Mombello, E. E., & Rattá, G. (2016). Evaluación de la pérdida de vida del aislamiento solido en transformadores de potencia, estimando la historia de carga y los perfiles de temperatura ambiente por medio de redes neuronales artificiales y simulaciones de Monte Carlo. *In DYNA* (Vol. 83, Issue 197, p. 104). Universidad Nacional de Colombia. DOU: 10.15446/dyna.v83n197.48134

[14] He, L., Li, L., Li, M., Li, Z., & Wang, X. (2022). A Deep Learning Approach to the Transformer Life Prediction Considering Diverse Aging Factors. *In Frontiers in Energy Research* (Vol. 10). Frontiers Media SA. DOI: 10.3389/fenrg.2022.930093

[15] El-Bataway, S. A., & Morsi, W. G. (2019). Distribution Transformer's Loss of Life Considering Residential Prosumers Owning Solar Shingles, High-Power Fast Chargers and Second-Generation Battery Energy Storage. *In IEEE Transactions on Industrial Informatics* (Vol. 15, Issue 3, pp. 1287–1297). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/tii.2018.2845416

[16] Diahovchenko, I., Petrichenko, R., Petrichenko, L., Mahnitko, A., Korzh, P., Kolcun, M., & Čonka, Z. (2022). Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles. *In Results in Engineering* (Vol. 15, p. 100592). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100592

[17] Schreider, Yu. A., Tee, G. J., & Henney, A. G. (1967). The Monte Carlo Method: The Method of Statistical Trials. *In Physics Today* (Vol. 20, Issue 1, pp. 129–129). AIP Publishing. DOI: 10.1063/1.3034116

[18] Shevchenko, S. Yu., Volokhin, V. V., & Diahovchenko, I. M. (2018). Power quality issues in smart grids with photovoltaic power stations. *In Energetika* (Vol. 63, Issue 4). Lithuanian Academy of Sciences. DOI: 10.6001/energetika.v63i4.3623

[19] Seme, S., Lukač, N., Štumberger, B., & Hadžiselimović, M. (2017). Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks. *In Energy* (Vol. 139, pp. 1261–1266). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.088

[20] Diahovchenko, I., Dolník, B., Kanálik, M., & Kurimský, J. (2021). Contemporary electric energy me-

ters testing under simulated nonsinusoidal field conditions. *In Electrical Engineering* (Vol. 104, Issue 2, pp. 1077–1092). Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s00202-021-01365-8

[21] Volokhin, V. V., Diahovchenko, I. M., & Derevyanko, B. V. (2017). Prospects of nanomaterials use in current and voltage hall sensors to improve the measurements accuracy and reduce the external impacts. *In 2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). 2017 IEEE 7th International Conference "Nanomaterials: Application & Properties" (NAP). IEEE.* DOI: 10.1109/nap.2017.8190239

[22] Shevchenko, S., Dovgalyuk, O., Danylchenko, D., Rubanenko, O., Fedorchuk, S., & Potryvai, A. (2021). Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink. *In 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. DOI: 10.1109/ukrcon53503.2021.9575747

[23] Fedorchuk, S., Ivakhnov, A., Bulhakov, O., & Danylchenko, D. (2020). Optimization of Storage Systems According to the Criterion of Minimizing the Cost of Electricity for Balancing Renewable Energy Sources. *In 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. DOI: 10.1109/khpiweek51551.2020.9250155

[24] Müller, M., Viernstein, L., Truong, C. N., Eiting, A., Hesse, H. C., Witzmann, R., & Jossen, A. (2017). Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe. *In Journal of Energy Storage* (Vol. 9, pp. 1–11). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.est.2016.11.005

[25] Beer, C. (1995). Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic.Bart Kosko. *In The Quarterly Review of Biology* (Vol. 70, Issue 2, pp. 210–210). University of Chicago Press. DOI: doi.org/10.1086/418985