

V. S. NOZDRENKOV, I. M. DYAGOVCHENKO, M. V. PETROVSKYI, V. V. VOLOKHIN

МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ СТАРІННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Зараз світ рухається до більш екологічних видів транспорту. Як наслідок, продажі електромобілів зростають за експоненціальним законом, а нові навантаження, пов'язані з їх заряджанням, можуть негативно впливати на роботу електромереж та їх елементів. Нерегульоване одночасне застосування великої кількості пристроїв заряджання електромобілів може викликати аварійні відключення в електричній мережі. Враховуючи стохастичний характер додаткового навантаження від електромобілів, важко передбачити таке навантаження аналітичними методами. Математичний апарат нечіткої логіки може бути використаний для формалізації задач з невизначеністю. В даній роботі у середовищі MATLAB-Simulink було розроблено блок-схему алгоритму на основі нечіткої логіки, яка оцінює вплив навантаження від заряджання електромобілів на старіння масляних силових трансформаторів, а також побудована нечітка модель й оцінено вплив для різних відсотків кількості електромобілів. Модель на основі нечіткої логіки включає вплив температури навколишнього середовища, показників якості електроенергії та перевантажень трансформатора. Вона містить діагностичну частину, яка попереджає диспетчера електромережі про можливі проблеми, надаючи актуальну інформацію про стан трансформатора. Крім того, було проаналізовано ефективність застосування фотоелектричних станцій для збільшення терміну служби розподільних трансформаторів. Результати показують, що для високих рівнів використання електромобілей фотоелектричні станції не дають достатнього ефекту і потрібно використати більш просунуті стратегії.

Ключові слова: електромобілі, старіння трансформатора, акумуляторна батарея, фотоелектрична генерація, розподільна система електропостачання, якість електричної енергії, компенсація реактивної потужності, нечітка логіка, блок-схема алгоритму.

V. S. NOZDRENKOV, I. M. DIAHOVCHENKO, M. V. PETROVSKYI, V. V. VOLOKHIN

FUZZY LOGIC-BASED ESTIMATION MODEL OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS AGING

Currently, we are moving towards more ecological modes of transport. As a result, the demand for electric vehicles is growing exponentially, and new loads, related to charging, can negatively affect the operation of electrical grids and their elements. Concurrent and uncontrolled charging of electric vehicles can cause a blackout. Considering the stochastic nature of the additional load from electric cars, it is difficult to predict such a load by analytical methods. The fuzzy logic approach can be used to formalize the tasks with ambiguity. In this paper, a fuzzy-based block diagram of the algorithm was developed in the MATLAB-Simulink environment for evaluating the impact of the charging load of electric vehicles on the aging of transformers, as well as a model was built and the effect of various penetrations of electric cars was evaluated. The fuzzy logic-based model includes the effects of ambient temperature, power quality, and overloads. It contains a diagnostic part that warns the dispatcher of the power distribution network about possible problems, providing up-to-date information about the state of the transformer. In addition, the efficiency of photovoltaic generators to increase the service life of distribution transformers was analyzed. The results show that photovoltaic power plants are not effective enough for high levels of electric vehicle penetration, and more advanced strategies should be used.

Keywords: electric vehicles, transformer aging, battery energy storage, photovoltaic generation, power distribution grid, reactive power compensation, fuzzy logic, block diagram of the algorithm.

Вступ. Щоб задовольнити майбутні потреби в мобільності, зменшити викиди, пов'язані з кліматом і здоров'ям, а також поступово відмовитися від залежності від нафти, традиційні технології двигунів повинні бути замінені більш ефективними та екологічними альтернативами, такими як електромобілі (ЕМ) [1]. У той же час кілька країн (наприклад, Німеччина, Данія, Швеція) вирішили перевести виробництво електроенергії з нафти на відновлювані джерела енергії, зробивши електромобілі ще більш екологічними порівняно з автомобілями внутрішнього згоряння. Дослідження виявили докази того, що перехід на електромобілі має величезне значення для навколишнього середовища, включаючи загальну якість повітря та скорочення викидів вуглецю [2]. Електромобілі, порівняно з дизельними або бензиновими автомобілями, виробляють менше викидів протягом життєвого циклу, і ці викиди можна ще більше зменшити за допомогою електроенергії, виробленої з екологічно чистих відновлюваних джерел, таких як вітер і сонце. До цього часу електромобілі поступово збільшували свою кількість на ринку. Відповідно до останнього випуску «Global Electric Vehicle Outlook» від Міжнародного

енергетичного агентства [3], у 2021 році продажі електромобілів подвоїлися до нового рекорду в 6,6 мільйона, і інтерес продовжував стрімко зростати до 2022 року, незважаючи на перебої у світовому постачанні електромобілей.

Мета статті. Метою статті є розробка інформаційної моделі старіння мережевих трансформаторів за допомогою нечіткої логіки.

Постановка проблеми та мотивація. Для розподільчої електричної мережі електромобілі є передусім додатковим навантаженням стохастичного характеру, що ускладнює процес управління енергосистемою та впливає на її надійність. Наприклад, заряджання електромобілів у години пік збільшує загальну потребу в потужності енергосистемі та може призвести до перевантаження трансформатора та порушення енергопостачання [4].

За даними [5], до 4 із 5 випадків підзарядки електромобілів відбувається в житлових будинках, а приблизно 1 із 5 випадків підзарядки відбувається на робочому місці. Як правило, живлення житлових будинків в Європі здійснюється через електричні мережі, які підключені до розподільних трансформаторів. Тому ця робота зосереджена на

© В. С. Ноздренков, І. М. Дяговченко, М. В. Петровський, В. В. Волохін, 2024

виявленні впливу домашнього зарядного пристрою на розподільні трансформатори, що живлять ці електромережі. Сучасні житлові будинки адаптовані до потужних швидких зарядних пристроїв на 10–22 кВт на відміну від традиційної зарядки на 3–6 кВт [6]. Декілька пристроїв зі швидкою зарядкою 20 кВт, що працюють одночасно, можуть стати причиною відключення в невеликій мережі з трансформаторами, які не розраховані на таке навантаження. Перевищення номінальної потужності призводить до підвищення температури обмоток, відводів, ізоляції та масла, яка може досягати неприпустимих значень. Крім того, збільшується індукція магнітного потоку, що веде до збільшення вихрових струмів, які нагрівають металеві частини трансформатора. У результаті виникає ризик пошкодження, пов'язаний із величиною струму та температурою, а також прискорюється старіння. Паралельно з цим продовжують зростати гармонійні спотворення в електроенергетичних системах через поширення нелінійних навантажень та електронних пристроїв [7]. Крім того, фотоелектричні (ФЕ) системи з низькою потужністю короткого замикання можуть впливати на профіль напруги та спричинити гармонійні спотворення напруги та струму [8], [9]. Коли нелінійні навантаження підключаються до розподільних мереж, вони, як правило, споживають нелінійні струми і, як наслідок, спотворюють напругу системи [10]. Найбільш суттєвим ефектом гармонійних спотворень в мережі розподілу електроенергії є підвищення температури, що призводить до збільшення втрат потужності, зниження номінальних характеристик трансформатора та можливих поломок обладнання [11]. Крім того, гармонійні спотворення можуть негативно впливати на пристрої з мікроконтролерами, лічильники електроенергії, вимикачі та реле, викликаючи їх нестабільну роботу [12, 13].

Споживання потужності в електричній мережі.

Як об'єкт дослідження розглядається розподільна електромережа, яка характерна для електропостачання сільської місцевості Європи. Можлива конфігурація такої мережі показана на рис. 1. Радіальна фідерна лінія оснащена масляним трансформатором 20/0,4 кВ або 10/0,4 кВ і живить житлові будинки та місцеве підприємство.

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

$$S_{T,t}^{3\phi} = \sqrt{(P_{\text{спож},t} + P_{EMs,t} - P_{\text{ФЕ},t})^2 + Q_{\text{спож},t}^2}, \quad (1)$$

де $P_{\text{спож},t}$, $Q_{\text{спож},t}$ – активна та реактивна потужності споживачів відповідно; $P_{EMs,t}$ – потреба в потужності електромобілів; $P_{\text{ФЕ},t}$ – вихідна потужність сонячної панелі. Тривалість кожного етапу становить 1 годину.

Для значень $P_{\text{спож},t}$ і $Q_{\text{спож},t}$ у цій роботі використовуються дані споживання електроенергії 11 реальних житлових будинків і малого підприємства.

Середній коефіцієнт потужності (КП) загального навантаження від побутових та виробничих споживачів становить 0,8. Передбачається, що

фотоелементи та електромобілі мають коефіцієнт потужності, що дорівнює одиниці.

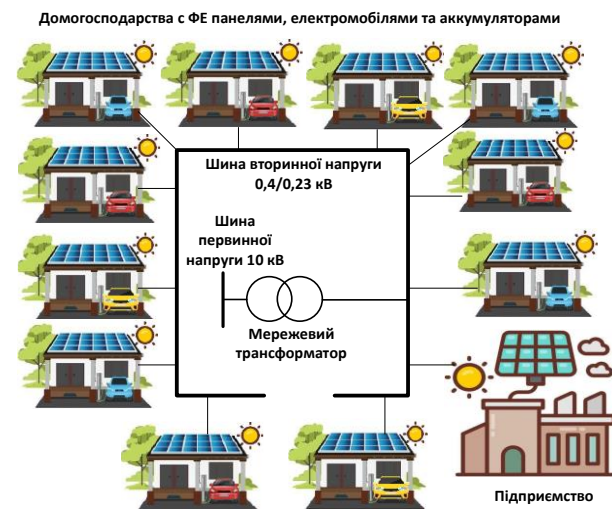


Рисунок 1 – Розподільна мережа

Крива погодинного навантаження $P_{EMs,t}$, що створюється електромобілями була відтворена з [14]. Відповідно до результатів [15], відмінності в поведінці заряджання електромобілів у різні пори року є обмеженими (тобто немає конкретних сезонних закономірностей), і немає суттєвої різниці в часі початку зарядки між будніми або між вихідними. Таким чином, для цього дослідження використовуються дві узагальнені криві споживання для цілого року: одна для робочих днів, інша для вихідних. Події нарахування плати за святкові дні розглядаються як будні або вихідні, залежно від дня тижня, коли відбулося свято. Крім того, передбачається, що попит на зарядку електромобілів у вихідні приблизно в 2/3 рази менший, ніж у робочий день. Електрична потужність фотоелементу, $P_{\text{ФЕ},t}$, розраховується на основі математичної моделі з [16], використовуючи дані про сонячне опромінення та дані температури навколишнього середовища з фотоелектричної геоінформаційної системи (PVGIS) [17] для географічних координат міста Херсона. Такий підхід розрахунку є універсальним і може бути застосований до будь-якої ділянки мережі за наявності вихідних даних про цю ділянку.

Вищі гармоніки і температура. Ще два фактори, які слід включити в модель, це температура навколишнього середовища та якість електроенергії. Дані про температуру навколишнього середовища для розглянутого географічного розташування були взяті з PVGIS [17]. Аспект якості електроенергії представлений через гармонічні спотворення напруги. Гармоніка напруги основної частоти та вищі гармоніки були синтетично згенеровані з використанням випадкового розподілу в таких діапазонах:

- 90–110 % для основної гармоніки;
- 0–7,5 % для 3-ї гармоніки;
- 0–9 % для 5-ї гармоніки;
- 0–7,5 % для 7 гармоніки;
- 0–5,25 % для 11-ї гармоніки.

Ці діапазони в 1,5 рази ширші порівняно з допустимими відносними рівнями напруги, встановленими в EN 50160:2010. У цьому випадку передбачається, що електрична мережа насичена вищими гармоніками, які можуть надходити від нелінійних навантажень, фотоелектричних інверторів і, певною мірою, від інверторів [8, 13, 18]. Кумулятивний вплив вищих гармонік на розподільний трансформатор можна опосередковано оцінити через повний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD) [10]:

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}, \quad (2)$$

де V_{THD} – сумарне гармонійне спотворення напруги; V_h – середньквадратичні значення амплітуд відповідних гармонік (RMS); V_1 – амплітуда основної (першої) гармоніки напруги RMS.

Моделі роботи системи. У цій роботі було розроблено дві моделі роботи системи. Їх опис наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Моделі роботи системи

Модель	Опис
Базова модель	Фідер містить лише житлові та виробничі навантаження та електромобілі. Було розглянуто шість рівнів кількості електромобілів, а саме 15 %, 33 %, 50 %, 67 %, 85 % і 100 %. Середній КП навантажень, за винятком зарядних навантажень ЕМ, становить 0,8.
Модель 1	Блоки фотоелектричної генерації були додані до електричної мережі. Це можуть бути фотоелектричні системи на даху, автономні фотоелектричні системи або громадські фотоелектричні системи на вторинній стороні трансформатора. Встановлена потужність фотоелектричних установок становить 100 % від паспортної потужності трансформатора. Вихід генерації ФЕ можна регулювати для керування КП.

Алгоритм і опис моделі. Розробка діагностичного інструменту, для застосування в енергетиці може бути складною, оскільки його потрібно налаштувати на конкретну систему, і зазвичай потрібно провести кілька вимірювань і порівняти їх для отримання прийнятної достовірності [11]. Тому для аналізу граничних станів (перевантаження, температурний перегрів) під час роботи трансформатора було обрано математичний інструмент нечіткої логіки. Модель на основі нечіткості може працювати з нечітко визначеними вхідними даними; вона аналізує параметри та фактори, що впливають на нормальну роботу трансформатора, і допомагає передбачити аварійні ситуації. Використовуючи сигнали від контролера нечіткої логіки, автоматика запобігає перевантаженню трансформатора.

Блок-схема на рис. 2 описує етапи реалізації запропонованого алгоритму на основі нечіткої логіки. Цей алгоритм є загальним для кожного сценарію, представленого в табл. 1, але деякі блоки можуть бути

активовані чи ні в процесі, залежно від досліджуваного випадку.

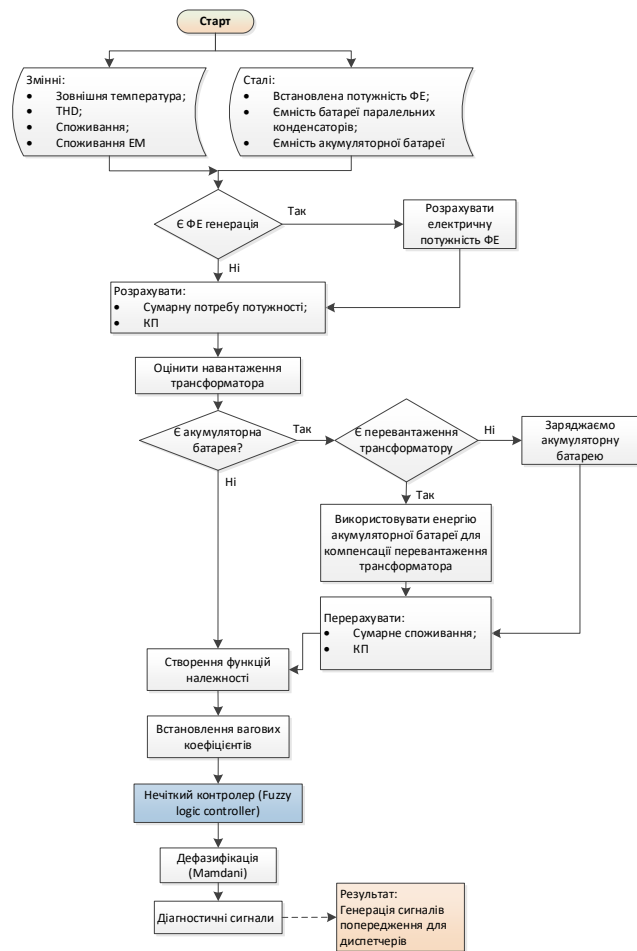


Рисунок 2 – Алгоритм запропонованого фази контролеру

Після завантаження вхідних даних необхідно розрахувати параметри електричної мережі, такі як сумарне споживання електроенергії на вторинній шині трансформатора та КП. Далі має бути використана система керування з нечіткою логікою для діагностики розподільного трансформатора. Алгоритм складається з набору вхідних функцій належності (MF), контролера на основі правил і процесу дефазифікації. MF – це криві, які визначають, як кожна точка у вхідному просторі відображається на значення приналежності між 0 і 1 [19]. Нечіткий логічний вхід використовує MF для визначення нечіткого значення вхідного сигналу [19]. У MATLAB Fuzzy Logic Toolbox доступні різні топології MF, такі як трикутна, трапецієподібна, гаусова, поліноміальна, сигмоподібна. Гармонічні спотворення напруги (harmonic_voltage), температура навколишнього середовища (temperature) та результуюче навантаження трансформатора (loading) є трьома входами в систему нечіткої логіки для діагностики (рис. 3), і кожен вхід має кілька MF. Потім задаються атрибути, щоб додати вагу до різних входів. Для дефазифікації була обрана нечітка система Мамдані з методом центроїда [20].

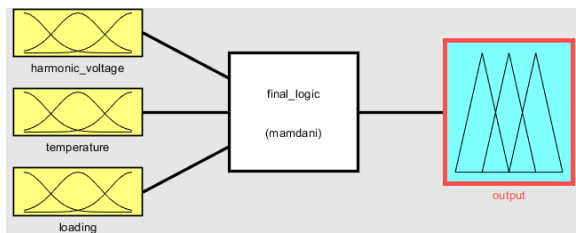


Рисунок 3 – Нечітка система діагностики

Діагностична система використовує випадково згенеровані дані для гармонік напруги, як описано раніше. Існує три функції належності гармонік напруги, які визначають THD в діапазоні від 0 % до 12 % як низький, середній або високий (рис. 4 а). Температура навколишнього середовища має чотири функції належності, що знаходяться в межах від $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4 б). Для навантаження (рис. 4 в) є три функції належності, які розділяють діапазон від 0 % до 200% на зони «низького», «нормального» та «перевантаження». Крім того, вхід «гармонійна напруга» має вагу 1, вхід «температура» має вагу 1,15, а вхід «навантаження» має вагу 1,25.

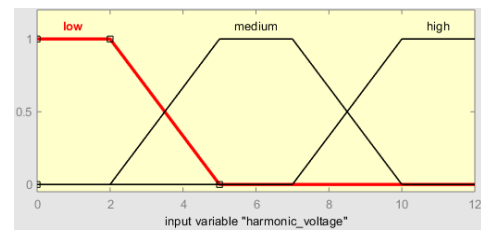
Вихід також має набір функцій належності, які визначають можливі реакції та виходи досліджуваної системи [11]. У створеній моделі є чотири вихідних MF (рис. 4 з):

- «Немає проблеми – No_issue»,
- «Увага – Attention»,
- «Можлива проблема – Possible_issue»,
- «Неминуча проблема – Inevitable_issue».

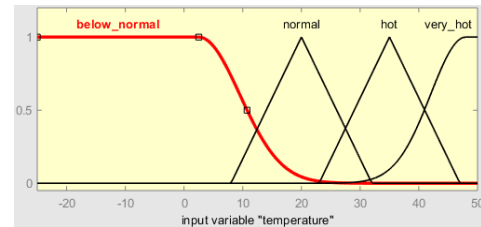
Далі всі вихідні MF об'єднуються в один агрегований нечіткий набір. Чітке значення для представлення невизначених даних із цієї агрегованої топології отримується за допомогою процесу дефазифікації. Правила для діагностичної частини алгоритму визначаються користувачем і наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Нечіткі правила алгоритму діагностики

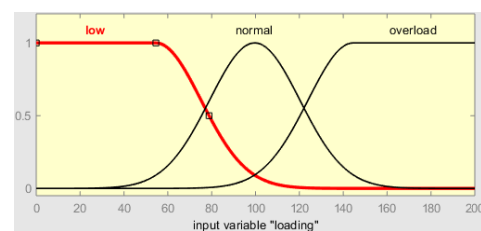
Temperature	THD	Loading	Output
below normal	low	low	No issue
below normal	low	normal	No issue
below normal	medium	low	No issue
below normal	medium	normal	Attention
below normal	high	low	No issue
below normal	high	normal	Possible issue
normal	low	low	No issue
normal	low	normal	Attention
normal	medium	low	Attention
normal	medium	normal	Possible issue
normal	high	low	Attention
normal	high	normal	Possible issue
hot	low	low	Attention
hot	low	normal	Possible issue
hot	medium	low	Possible issue
hot	medium	normal	Inevitable issue
hot	high	low	Possible issue
hot	high	normal	Inevitable issue
very hot	—	—	Inevitable issue
—	—	overload	Inevitable issue



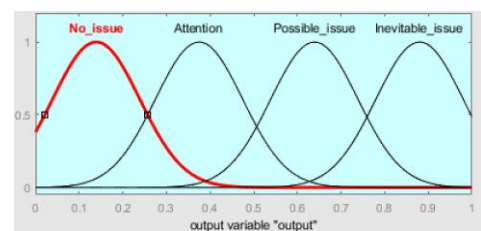
а



б



в



г

Рисунок 4 – Графіки функцій належності:
а – THD напруги; б – температура навколишнього середовища; в – навантаження; г – вихід діагностичного контролера нечіткої логіки

Коли система нечіткого управління визначена, її можна експортувати в модель Simulink. Вхідні дані обробляються контролером нечіткої логіки, нечіткий вихід декодується та розбивається на чотири діапазони, а потім виводиться ціле число від 0 до 3 і надсилається до областей і змінних робочої області. Ці цілі числа відображають стан трансформатора та можуть бути розшифровані як повідомлення про ступінь попередження для диспетчера системи розподілу, які мають наступні чотири типи: «Немає проблем», «Увага», «Можлива проблема», «Неминуча проблема». У разі «неминучої проблеми» сигнал тривоги може бути надісланий до центру управління системою розподілу. Таким чином, діагностична частина моделі контролює стан розподільного трансформатора та генерує попереджувальне повідомлення для диспетчера системи розподілу.

Модель в MATLAB, що реалізована на основі алгоритму нечіткої логіки показано на рис. 5.

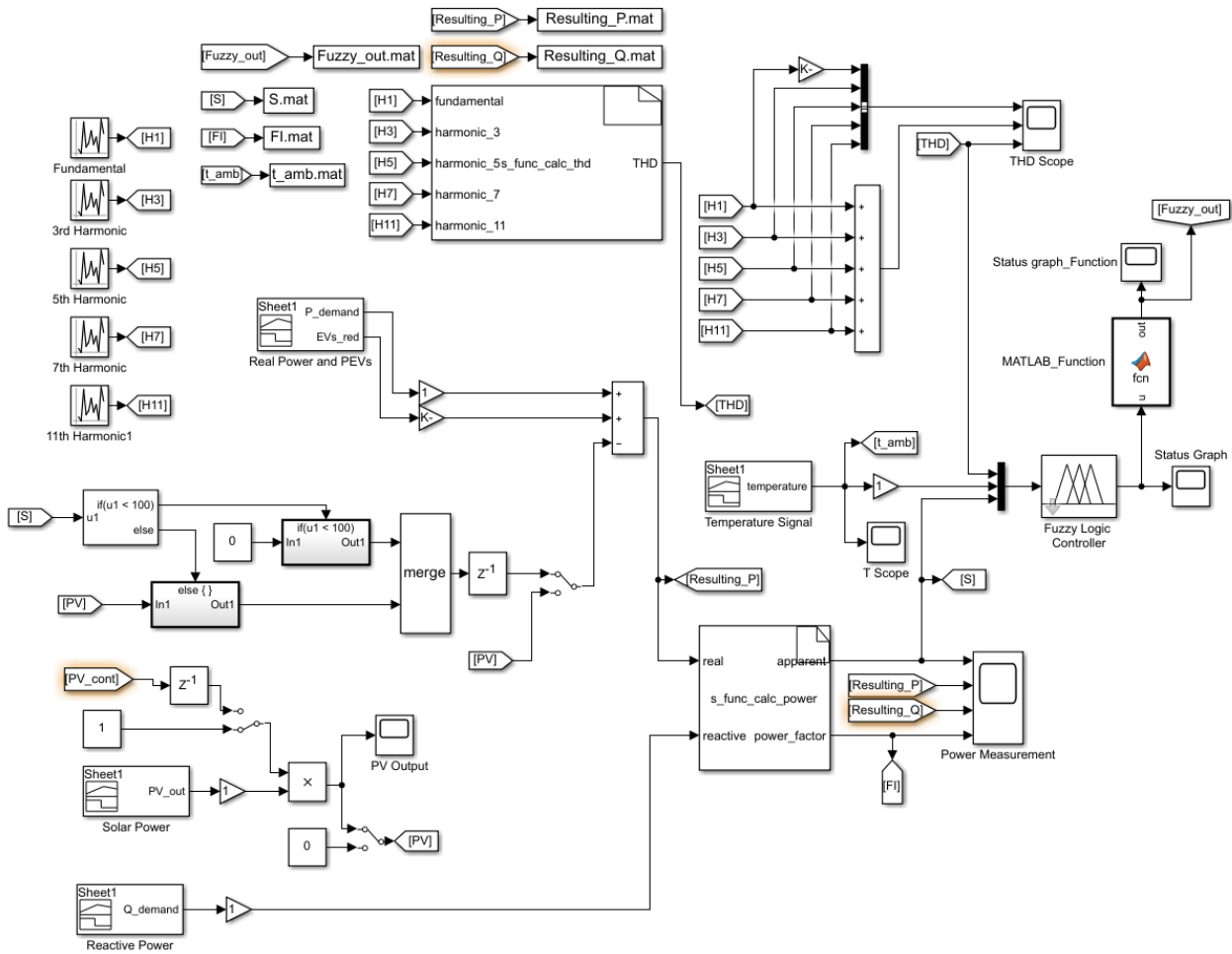


Рисунок 5 – Модель на основі нечіткої логіки для MATLAB-Simulink

Модель старіння трансформатора. Старіння трансформатора в основному пов'язане з погіршенням ізоляції обмотки, яка є функцією температури, зокрема температури найгарячішої точки обмотки (θ_{HS}) [21]:

$$\theta_{HS,t} = \theta_{A,t} + \Delta\theta_{O,t} + \Delta\theta_{HSO,t}, \quad (3)$$

де θ_A – температура охолоджувального середовища (температура навколишнього середовища), °C; $\Delta\theta_O$ – перевищення температури масла у верхній частині трансформатора (тобто температури у верхніх шарах) над температурою навколишнього середовища, °C; $\Delta\theta_{HSO}$ – перевищення температури гарячої точки трансформатора над температурою масла у верхній частині, °C.

Деградацію ізоляції котушок можна оцінити за допомогою індексу деградації (LoL), який використовується в теплових моделях реального трансформатора [22–24]. Вважається, що підвищення температури $\Delta\theta_{O,t}$ і $\Delta\theta_{HSO,t}$ не залежать від температури охолоджувального середовища в діапазоні її зміни від +40 до -20 °C [24]. Динаміка членів, що характеризують підвищення температури (тобто $\Delta\theta_O$ і $\Delta\theta_{HSO}$), залежить від зміни температури в перехідних теплових процесах і зміни навантаження. Більш детально методика їх розрахунку представлена в [21]. Відносне зношування трансформатора оцінюється

за допомогою θ_{HS} шляхом обчислення коефіцієнта прискорення старіння [22]:

$$F_{AA} = e^{\left(\frac{15000}{\theta_{HS}^{ref} + 273} - \frac{15000}{\theta_{HS} + 273} \right)}, \quad (4)$$

де θ_{HS}^{ref} є сталонною температурою найгарячішої точки [22].

Сумарне відносне зношування для даного температурного циклу можна оцінити за допомогою еквівалентного коефіцієнта старіння, який дорівнює сумі відносного зношування для всіх інтервалів часу Δt_i ($i = 1, 2, \dots, M$), поділеного на суму інтервалів часу:

$$F_{EqA} = \frac{\sum_{i=1}^M F_{AA,i} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^M \Delta t_i}, \quad (5)$$

де $F_{AA,i}$ – коефіцієнт прискорення старіння для температури, яка існує протягом Δt_i ; M – загальна кількість інтервалів часу.

Річна деградація трансформатора визначається наступним чином:

$$LoL_y \% = \frac{F_{EqA} \cdot T}{L_N} \cdot 100, \quad (6)$$

де L_N – нормальний ресурс ізоляції, який дорівнює 180000 год, згідно [21], T – період часу. За один рік $T = 8760$ год.

Результати моделювання. У цьому розділі аналізуються результати моделювання для електричної мережі, яка працює за різних рівнів споживання ЕМ. Сценарії експлуатації наведено в табл. 1. Оцінено старіння трансформаторів. Під час моделювання було отримано діаграми попиту від побутових і промислових споживачів для різних випадків. Як приклад, діаграми, агреговані на стороні 0,4 кВ для зимового робочого дня для 100 % використання ЕМ, показані на рис. 6. Значення на осі ординат були перетворені в умовні одиниці, використовуючи номінальну потужність трансформатора як основу, і представлені у відсотках. Як бачимо, профілі навантаження мають ранковий і вечірній максимум. Крива 1 (синього кольору) – це сукупний попит на вторинній стороні трансформатора (базова модель), крива 2 (зелений) – сукупний попит після розгортання фотоелектричної системи (модель 1), крива 3 (сірий) відповідає потужності споживання побутового та промислового навантаження (табл. 1).

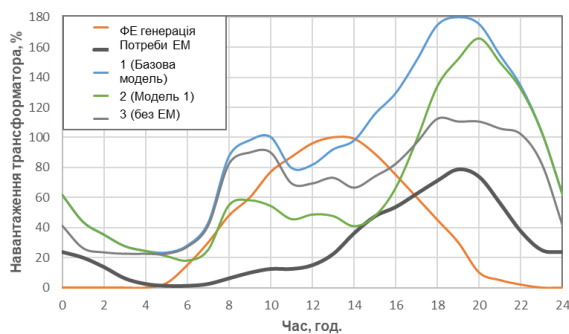


Рисунок 6 – Профілі споживання низьковольтної розподільної мережі при 100 % використанні ЕМ

Слід зауважити, що на рис. 6 лише демонструються профілі навантаження для певного дня для довідкових цілей, і протягом року ці профілі піддаються змінам відповідно до попиту на навантаження та вихідних даних ФЕ. З огляду на те, що потреби домогосподарства в енергії можуть

змінюватися в просторі та часі, електромобілі можуть мати більший або менший відносний вплив на певні типи профілів попиту. Однак із діаграм, рис. 6, можна зробити висновок, що заряджання ЕМ у поєднанні зі звичайним попитом на навантаження є найбільш небезпечним для трансформатора при високих рівнях використання ЕМ. Таким чином, трансформатор є найбільш вразливим місцем розглянутого розподільного фідера; його потужність, ймовірно, буде перевищена при високому проникненні електромобілів, що буде розкрито більш детально.

Вичерпні результати щодо старіння трансформатора можна отримати шляхом тестування алгоритму на річній моделі для розглянутих профілів попиту електричної мережі. Тривалість режимів роботи трансформатора, відповідно до виходу нечіткої логіки, відповідного агрегованого відносного зношування та значень LoL для різних рівнів проникнення ЕМ узагальнено в табл. 3.

Як видно, існує кореляція між тривалістю найнебезпечнішого ступеня попередження та річного коефіцієнту рівня деградації (LoL) трансформатора у відсотках. Для рівнів проникнення ЕМ 15 %, 30 % і 50 %, навантаження заряджання мають незначний вплив на зношення трансформатора, і стратегії посилення мережі не потрібні, оскільки їх вплив незначний. Комбінований вплив заряджання електромобілів і регулярних навантажень (базовий варіант) є найбільш руйнівним для трансформатора: для екстремальних – 100 % проникнення ЕМ LoL досягає небезпечних 31,43 %, а для проникнення 85% ЕМ значення LoL становить 8,13 %. Для проникнення 67 % ЕМ рівень деградації становить до 1,67 %, що не є значним для трансформатора, з масляним охолодженням.

Введення фотоелектричних блоків (модель 1) лише незначною мірою пом'якшує старіння: фотоелектрична генерація має переривчастий характер і зазвичай робить свій основний внесок опівдні, що збігається ні з ранковим, ні з вечірнім піком попиту. Таким чином, фотоелектричні установки не можна розглядати як окремий захід для зменшення LoL трансформатора, і їх роль є лише допоміжною.

Таблиця 3 – Статуси трансформатора та індекс деградації LoL за цілий рік

Модель	Застосування ЕМ	Проміжок часу для стану, год.				F_{EqA}	LoL , %
		Немає проблеми	Увага	Можлива проблема	Неминуча проблема		
Базова модель	15%	3444.99	4582.98	732.03	0	0.0066	0.0319
Модель 1		3580.78	4586.82	592.40	0	0.0052	0.0252
Базова модель	33%	3097.51	4674.65	985.57	2.26	0.0223	0.1084
Модель 1		3275.67	4700.90	783.44	0	0.0195	0.0947
Базова модель	50%	2864.85	4546.33	1340.34	8.48	0.0764	0.3717
Модель 1		2893.19	4596.10	1262.24	8.47	0.0758	0.3687
Базова модель	67%	2698.18	4230.47	1810.95	20.41	0.3416	1.6625
Модель 1		2720.21	4375.49	1650.29	14	0.3278	1.5951
Базова модель	85%	2573.57	3907.22	2175.67	103.54	1.6711	8.1328
Модель 1		2885.94	3978.13	1821.57	74.36	1.6276	7.9210
Базова модель	100%	2543.82	3699.94	2221.05	295.19	6.4589	31.4335
Модель 1		2883.30	3797.65	1837.59	241.47	6.3371	30.8405

Висновки. У цьому дослідженні представлено блок схему на основі нечіткої логіки для діагностики старіння трансформатора, що живить систему розподілу електроенергії з високим рівнем проникнення підключених електромобілів. Кілька негативних факторів, що впливають на трансформатори, були розглянуті та включені в модель: температура навколишнього середовища, низька якість електроенергії та перевантаження, спричинені надмірним споживанням електроенергії від регулярних навантажень і заряджання ЕМ. Було оцінено ефективність використання фотоелектричних елементів для підсилення мережі для запобігання неприйнятним значенням *LoL* трансформатора.

Запропонований алгоритм виконує діагностику стану масляного трансформатора, і видає ступінь попередження (тобто повідомлення) для диспетчера системи розподілу. Коли стан трансформатора відповідає «Неминучій проблемі», диспетчер системи розподілу повинен вжити заходів для запобігання потенційній аварійній ситуації.

Продемонстровано чітку залежність ймовірності неприпустимого перевантаження трансформатора та зниження терміну його служби від рівня проникнення ЕМ. За використання ЕМ на рівні 85 % навантаження заряджання в поєднанні зі звичайним попитом на навантаження призводять до втрати ресурсу трансформатора на 8,13 %, а при кінцевому проникненні ЕМ 100 % *LoL* досягає 31,43 %, що неминуче призведе до відмови.

Розроблений алгоритм і засіб на основі фазі-логіки 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 *LoL* трансформаторів, які включають планування зарядки ЕМ та еластичність попиту. Також можна розглянути використання батареї статичних конденсаторів (SCB) і акумуляторних батарей (BESS).

Список літератури

- Ahmadi P. Environmental impacts and behavioral drivers of deep decarbonization for transportation through electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 225. P. 1209–1219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.334>.
- Lattanzio R. K., Clark C. E. Environmental Effects of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. 2020. 41 p. URL: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46420>.
- International Energy Agency. Global EV Outlook 2022. Paris, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- Uncontrolled Electric Vehicle Charging Impacts on Distribution Electric Power Systems with Primarily Residential, Commercial or Industrial Loads / C. B. Jones et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 6. 1688. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14061688>.
- Factors Affecting Demand for Plug-in Charging Infrastructure: An Analysis of Plug-in Electric Vehicle Commuters / G. Tal et al. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7922/G2ST7N3K>.
- Solberg P. Electric vehicles and charging stations in Europe. 2021.
- The influence of nonsinusoidal supply voltage on the amount of power consumption and electricity meter readings / V. Volokhin et al. *Energetika*. 2017. Vol. 63, no. 1. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.6001/energetika.v63i1.3503>.
- Volokhin V. V., Diahovchenko I. M., Derevyanko B. V. Electric energy accounting and power quality in electric networks with photovoltaic power stations. *2017 IEEE International Young Scientists' Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, 17–20 October 2017. P. 36–39. DOI: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126588>.
- Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks / S. Seme et al. *Energy*. 2017. Vol. 139. P. 1261–1266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.088>.
- Contemporary electric energy meters testing under simulated nonsinusoidal field conditions / I. Diahovchenko et al. *Electrical Engineering*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01365-8>.
- Klingenberg B. R., Ribeiro P. F. Fuzzy Logic Application for Time-Varying Harmonics. *Time-Varying Waveform Distortions in Power Systems*. Chichester, UK. P. 197–209. URL: <https://doi.org/10.1002/9780470746752.ch17>.
- Volokhin V. V., Diahovchenko I. M., Derevyanko B. V. Prospects of nanomaterials use in current and voltage hall sensors to improve the measurements accuracy and reduce the external impacts. *2017 IEEE 7th International Conference "Nanomaterials: Application & Properties" (NAP)*, Odessa, 10–15 September 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/nap.2017.8190239>.
- Mantilla H. F. M., Pavas A., Duran I. C. Aging of distribution transformers due to voltage harmonics. *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, Bogota, Colombia, 31 May – 2 June 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/pepqa.2017.7981649>.
- Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load / P. Paevere et al. *Sustainability Science*. 2013. Vol. 9, no. 1. P. 61–76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-013-0235-3>.
- Quiros-Tortos J., Ochoa L., Butler T. How Electric Vehicles and the Grid Work Together: Lessons Learned from One of the Largest Electric Vehicle Trials in the World. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2018. Vol. 16, no. 6. P. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2018.2863060>.
- Application of photovoltaic panels in electric vehicles to enhance the range / I. Diahovchenko et al. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, no. 12. e12425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12425>.
- Solar Energy Calculator and Mapping Tool | PVGIS. *PVGIS Photovoltaic Geographical Information System*. URL: <https://pvgis.com/>.
- Dao T., Phung B. T. Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 347–354. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0498>.
- Foundations of Fuzzy Logic. *MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink*. URL: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>.
- Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, no. 1. P. 1–13. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(75)80002-2).
- C57.91-2011. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. Revision of IEEE Std C57.91-1995. Official edition. 123 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6166928>.
- A Deep Learning Approach to the Transformer Life Prediction Considering Diverse Aging Factors / L. He et al. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.930093>.
- El-Bataway S. A., Morsi W. G. Distribution Transformer's Loss of Life Considering Residential Prosumers Owning Solar Shingles, High-Power Fast Chargers and Second-Generation Battery Energy Storage. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. Vol. 15, no. 3. P. 1287–1297. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2845416>.
- Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles / I. Diahovchenko et al. *Results in Engineering*. 2022. 100592. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100592>.

References

- P. Ahmadi, "Environmental impacts and behavioral drivers of deep decarbonization for transportation through electric vehicles", *Journal*

- of *Cleaner Production*, vol. 225, pp. 1209–1219, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.334>
2. R. K. Lattanzio and C. E. Clark, “Environmental effects of battery electric and internal combustion engine vehicles”, R46420, Jun. 2020. [Online]. Available: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46420>
 3. International Energy Agency, “Global EV outlook 2022”, Paris, May 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>
 4. C. B. Jones, M. Lave, W. Vining, and B. M. Garcia, “Uncontrolled electric vehicle charging impacts on distribution electric power systems with primarily residential, commercial or industrial loads”, *Energies*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, Art. no. 1688, doi: <https://doi.org/10.3390/en14061688>
 5. G. Tal, D. Chakraborty, A. Jenn, J. Lee, and D. Bunch, “Factors affecting demand for plug-in charging infrastructure: An analysis of plug-in electric vehicle commuters”, UC-ITS-2019-42, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.7922/G2ST7N3K>
 6. P. Solberg, “Electric vehicles and charging stations in Europe”, 2021.
 7. V. Volokhin, I. Diahovchenko, V. Kurochkina, and M. Kanálik, “The influence of nonsinusoidal supply voltage on the amount of power consumption and electricity meter readings”, *Energetika*, vol. 63, no. 1, pp. 1–7, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.6001/energetika.v63i1.3503>
 8. V. V. Volokhin, I. M. Diahovchenko, and B. V. Derevyanko, “Electric energy accounting and power quality in electric networks with photovoltaic power stations”, in *2017 IEEE International Young Scientists' Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, Oct. 17–20, 2017, pp. 36–39, doi: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126588>
 9. S. Seme, N. Lukač, B. Štumberger, and M. Hadžiselimović, “Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks”, *Energy*, vol. 139, pp. 1261–1266, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.088>
 10. I. Diahovchenko, B. Dolník, M. Kanálik, and J. Kurimský, “Contemporary electric energy meters testing under simulated nonsinusoidal field conditions”, *Electrical Engineering*, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01365-8>
 11. B. R. Klingenberg and P. F. Ribeiro, “Fuzzy logic application for time-varying harmonics”, in *Time-Varying Waveform Distortions in Power Systems*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, LTD, pp. 197–209, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470746752.ch17>
 12. V. V. Volokhin, I. M. Diahovchenko, and B. V. Derevyanko, “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)*, Odessa, Sep. 10–15, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/nap.2017.8190239>
 13. H. F. M. Mantilla, A. Pavas, and I. C. Duran, “Aging of distribution transformers due to voltage harmonics”, in *2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, Bogota, Colombia, May 31–Jun. 2, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/pepqa.2017.7981649>
 14. P. Paevere, A. Higgins, Z. Ren, M. Horn, G. Grozev, and C. McNamara, “Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load”, *Sustainability Science*, vol. 9, no. 1, pp. 61–76, Nov. 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11625-013-0235-3>
 15. J. Quiros-Tortos, L. Ochoa, and T. Butler, “How electric vehicles and the grid work together: Lessons learned from one of the largest electric vehicle trials in the world”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 16, no. 6, pp. 64–76, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/mpe.2018.2863060>
 16. I. Diahovchenko, L. Petrichenko, I. Borzenkov, and M. Kolcun, “Application of photovoltaic panels in electric vehicles to enhance the range”, *Heliyon*, vol. 8, no. 12, Dec. 2022, Art. no. e12425, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12425>
 17. “Solar energy calculator and mapping tool | PVGIS.” PVGIS Photovoltaic Geographical Information System. [Online]. Available: <https://pvgis.com/>
 18. T. Dao and B. T. Phung, “Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 2, pp. 347–354, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0498>
 19. “Foundations of fuzzy logic.” MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html>
 20. E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, Jan. 1975, doi: [https://doi.org/10.1016/s0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7373(75)80002-2)
 21. *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*, C57.91-2011, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2012.6166928>
 22. L. He, L. Li, M. Li, Z. Li, and X. Wang, “A deep learning approach to the transformer life prediction considering diverse aging factors”, *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.930093>
 23. S. A. El-Batawy and W. G. Morsi, “Distribution transformer's loss of life considering residential prosumers owning solar shingles, high-power fast chargers and second-generation battery energy storage”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 1287–1297, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2845416>
 24. I. Diahovchenko *et al.*, “Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles”, *Results in Engineering*, Aug. 2022, Art. no. 100592, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100592>

Надійшло (received) 21.05.2024

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Ноздренков Валерій Станіславович (Nozdrenkov Valerii Stanislavovych) – кандидат технічних наук, доцент, Codeminders/Tristero Consulting, інженер-програміст; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com.

Дяговченко Ілля Миколайович (Diahovchenko Illia Mykolaiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8575-8280>; e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua.

Петровський Михайло Васильович (Petrovskiy Mykhailo Vasylovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри електроенергетики; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0387-3136>; e-mail: m.petrovskiy@etech.sumdu.edu.ua.

Волохін Віталій Васильович (Volokhin Vitalii Vasylovych) – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, доцент кафедри комп'ютерної інженерії; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8000-3193>; e-mail: v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua.