що якісно узгоджується з сучасними експериментальними й теоретичними дослідженнями електропорації клітин.

Список використаних джерел

1. Krassowska W., Filev P. D. Modeling Electroporation in a Single Cell. Biophysical Journal. 2007. Vol. 92, no. 2. P. 404–417. URL: https://doi.org/10.1529/biophysj.106.094235.

2. Kotnik T., Pucihar G., Miklavčič D. Induced Transmembrane Voltage and Its Correlation with Electroporation-Mediated Molecular Transport. The Journal of Membrane Biology. 2010. Vol. 236, no. 1. P. 3–13. URL: https://doi.org/10.1007/s00232-010-9279-9.

3. Gimsa J., Wachner D. A Unified Resistor-Capacitor Model for Impedance, Dielectrophoresis, Electrorotation, and Induced Transmembrane Potential. Biophysical Journal. 1998. Vol. 75, no. 2. P. 1107–1116. URL: https://doi.org/10.1016/s0006-3495(98)77600-3 .

УДК 621.315.2:620.193.4

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ АРРЕНІУСА ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ МЕХАНІЗМІВ СТАРІННЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ КАБЕЛІВ

Андрій Руденко, Віталій Мардзявко

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

Анотація. У роботі розглянуто застосування моделі Арреніуса для прогнозування довговічності кабельної ізоляції та проведення прискорених термічних випробувань. Проаналізовано залежність швидкості термодеструкції полімерних ізоляційних матеріалів від температури та показано можливість екстраполяції результатів короткочасних випробувань на нормальні умови експлуатації. Розглянуто визначення енергії активації процесу старіння за результатами випробувань при декількох підвищених температурах із використанням лінеаризованої залежності Арреніуса. Визначено роль коефіцієнта прискорення та температурного індексу під час оцінювання теплової витривалості ізоляційних матеріалів. Особливу увагу приділено умовам коректного застосування моделі, зокрема необхідності збереження домінуючого механізму старіння в досліджуваному температурному діапазоні. Показано перспективність використання моделі Арреніуса для оцінювання залишкового ресурсу кабелів та оптимізації прискорених випробувань.

Актуальність. Термін служби кабельних виробів визначається переважно швидкістю термодеструкції полімерної ізоляції та оболонки — процесами окиснення, розриву макромолекулярних ланцюгів і втрати пластифікатора, що прискорюються з підвищенням температури експлуатації. Оскільки реальний ресурс кабелів становить десятки років, безпосереднє випробування в номінальних теплових умовах є практично нездійсненним, тому основним інструментом прогнозування довговічності ізоляції слугують прискорені термічні випробування, результати яких екстраполюються на робочу температуру за допомогою моделі Арреніуса.

Виклад основного матеріалу. В основі моделі лежить рівняння Арреніуса, яке описує залежність константи швидкості хімічної реакції деструкції k від абсолютної температури T:

$$k(T) = A \cdot \exp(\frac{-E_a}{(RT)}) \qquad (1)$$

де A – передекспоненційний (частотний) множник, що характеризує ймовірність активних зіткнень молекул; E_a – енергія активації процесу деструкції ізоляції, Дж/моль; R – універсальна газова стала ($R \approx 8{,}314$ Дж/(моль·К)); T – абсолютна температура, К [1].

Оскільки термін служби ізоляції L обернено пропорційний швидкості реакції деструкції, підстановка $k(T)$ з (1) дає базове рівняння довговічності Арреніуса:

$$L(T) = A_1 \cdot \exp(\frac{-E_a}{(RT)}) \qquad (2)$$

Логарифмування виразу (2) лінеаризує залежність терміну служби від оберненої температури, що дає змогу визначити невідомі параметри A_1 та E_a графічно – методом найменших квадратів за результатами випробувань при кількох підвищених температурах:

$$\ln L = \ln A_1 + \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \qquad (3)$$

Графік залежності $\ln L$ від $\frac{1}{T}$ (діаграма Арреніуса) є прямою лінією з кутовим коефіцієнтом $\frac{E_a}{R}$, за яким визначається енергія активації, і з відрізком, що відсікається на осі ординат, який відповідає $\ln A_1$ [2-3].

Практичне застосування моделі при плануванні прискорених випробувань зводиться до обчислення коефіцієнта прискорення AF – відношення терміну служби за робочої (експлуатаційної) температури T_{use} до терміну служби за підвищеної температури випробування T_{test}:

$$AF = \frac{L(T_{use})}{L(T_{test})} = \exp\left[\left(\frac{E_a}{R}\right)\cdot\left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right] \qquad (4)$$

Знання AF дозволяє за відносно короткою тривалістю прискореного випробування t_{test} при температурі $T_{test} > T_{use}$ прогнозувати очікуваний термін служби ізоляції за нормальних умов експлуатації:

$$L(T_{use}) = AF \cdot t_{test} \qquad (5)$$

У міжнародній практиці (зокрема, у стандарті IEC 60216 щодо теплової витривалості електроізоляційних матеріалів) на основі рівнянь (2) – (3) визначають так званий температурний індекс матеріалу – температуру, за якої розрахунковий термін служби ізоляції досягає нормованого значення (типово 20 000 год), що є кількісним показником термостійкості кабельного виробу для порівняння різних матеріалів.

Особливості застосування до кабельної ізоляції

При проведенні прискорених випробувань кабелів зразки витримують у термостатах або камерах старіння за кількох (як правило, не менше трьох) фіксованих температур, що перевищують номінальну робочу температуру ізоляції, з періодовим контролем визначального параметра — відносного видовження при розриві, електричної міцності або тангенса кута діелектричних втрат — до досягнення критерію відмови (наприклад, зниження видовження до 50 % початкового значення). Отримані пари значень «час до відмови — температура випробування» апроксимуються рівнянням (3), а достовірність лінеаризації в координатах Арреніуса слугує непрямим підтвердженням того, що механізм деструкції в усьому дослідженому діапазоні температур залишається незмінним (єдиний домінуючий хімічний процес)[4].

Слід враховувати обмеження моделі: рівняння Арреніуса коректно екстраполює результати лише за умови, що підвищення температури випробування не змінює домінуючий механізм старіння (наприклад, не спричиняє плавлення кристалічної фази полімеру чи перехід до термоокиснювального механізму, відмінного від того, що діє за робочої температури); для складніших випадків, коли на деструкцію додатково впливають механічні напруження або вологість, модель Арреніуса доповнюють багатофакторною моделлю Ейрінга.

Висновок. Модель Арреніуса (рівняння 1–3) є математичною основою прогнозування довговічності кабельної ізоляції за результатами короткочасних прискорених випробувань при підвищених температурах: лінеаризація залежності $\ln L$ від $\frac{1}{T}$ дозволяє визначити енергію активації процесу термодеструкції E_a та екстраполювати очікуваний термін служби на робочу температуру

експлуатації через коефіцієнт прискорення AF (формули 4–5). Це робить модель ключовим інструментом нормативних методик оцінювання теплової витривалості кабельних матеріалів (зокрема, за IEC 60216), водночас вимагаючи контролю незмінності механізму старіння в усьому діапазоні температур випробування як умови коректності екстраполяції отриманих результатів на реальний термін експлуатації.

Список використаних джерел

1. The Lifetime Prediction and Insulation Failure Mechanism of XLPE for High-Voltage Cable. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2023. Vol. 30, no. 2. P. 761–768. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3215605.

2. Conductivity properties of XLPE insulation used for HVDC cable after accelerated thermal ageing. In: 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, 2018. DOI: 10.1109/ICPADM.2018.8401037.

3. Modelling of Insulation Thermal Ageing: Historical Evolution from Fundamental Chemistry Towards Becoming an Electrical Machine Design Tool. Energies. 2025. Vol. 18, no. 23. Art. 6087.

4. Overview of Monitoring, Diagnostics, Aging Analysis, and Maintenance Strategies in High-Voltage AC/DC XLPE Cable Systems. Sensors. 2025. Vol. 25, no. 22. Art. 7096.

УДК 004.9:519.854

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ВІДВІДУВАННЯ ЗАКЛАДІВ ВІДПОЧИНКУ З УРАХУВАННЯМ БЮДЖЕТНИХ ТА ЧАСОВИХ ОБМЕЖЕНЬ

Дмитро Мица, Володимир Безкоровайний

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Планування відпочинкових маршрутів є популярною задачею як для туристів, так і для мешканців сучасних міст. Існуючі картографічні сервіси будують маршрут між уже обраними користувачем закладами, але не обирають самі заклади. Туристичні путівники та агрегатори відгуків пропонують готові добірки закладів, проте не враховують індивідуальний бюджет, доступний час і графіки роботи конкретного дня. Сервіси планування подорожей формують маршрути за шаблонними сценаріями й не дають змоги кількісно задати пріоритетність власних критеріїв вибору.

Метою роботи є підвищення ефективності процесів планування маршрутів відвідування закладів відпочинку в містах за рахунок розроблення методу, який дозволить обирати множину локацій і порядок їх відвідування з максимальною сумарною корисністю за дотримання обмежень бюджету, часових вікон та графіків роботи закладів.

Запропонований метод реалізується в два етапи. На першому етапі вподобання користувача перетворюються на числові оцінки привабливості кожного закладу, на другому – розв’язується комбінаторна задача вибору підмножини закладів і порядку їх обходу.

Для оцінювання привабливості використано метод зваженої суми (SAW) [1]. Користувач задає бали важливості b_j для кожного з критеріїв, за якими обчислюються вагові коефіцієнти:

$$w_j = b_j / \sum_{j=1}^{m} b_j, \quad j = 1, \dots, m_j, \text{ де } m \text{ – кількість критеріїв.}$$

Приклад системи критеріїв і спосіб обчислення часткових оцінок наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Критерії відповідності закладу вподобанням користувача

Критерій	Що порівнюється	Часткова оцінка
s_1 Категорія	Пріоритет категорії закладу	$s_1 = \text{пріоритет} / 5$
s_2 Кухня	Кухня закладу та бажані кухні	1 при збігу, інакше 0
s_3 Ціна	Рівень закладу p і бажаний p^*	$s_3 = 1 - \lvert p - p* \rvert / 3$
s_4 Атмосфера	Теги закладу T і бажані T^*	$s_4 = \lvert T \cap T* \rvert / \lvert T* \rvert$