

# МОНІТОРИНГ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО ШАРУ НАГРІВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМ МОДЕЛЮВАННЯМ

## Вступ

Ключовим моментом сучасної наукової думки є використання енергозберігаючих технологій у всіх сферах побу-ту та промисловості. Це стосується й нагрівних пристроїв, що працюють шляхом перетворення електричної енергії в теплову. Трубочаті нагрівні елементи (ТЕНи) використовуються все рідше. Попри простоту конструкції та методів їх виготовлення, вони мають низку недоліків, що пов'язані з високою матеріалоемністю та тепловою інерційністю. Альтернативою для ТЕНів стало використання багат шарових нагрівних елементів з функціональними градієнтними шарами [1, 2]. Вони складаються з основи та послідовно нанесених на неї ізоляційного та резистивного шару. Шари у даному виробі мають строго визначені функціональні властивості: діелектричний шар – виконує функцію електроізо-лятора, а резистивний шар – струмопровідного тепловиділяючого шару. Дуже важливо в даному випадку забезпечити необхідний рівень властивостей цих шарів для надійної і довготривалої експлуатації виробу.

У даній роботі використано підходи нейромережевого моделювання у вигляді контролера нечіткої логіки T-Controller Workshop для прогнозування діелектричної міцності захисних ізоляційних шарів у плівкових нагрівних елементах. Його конструкція передбачає систему виходів для відповідних вхідних даних, що оцінюються правилами логічного виведення. Вхідними даними будуть результати реальних експериментів під час нанесення діелектричних шарів. Це дасть змогу визначити оптимальні параметри режиму формування цих шарів для забезпечення необхідного рівня функціональних властивостей. Таким чином, застосування такого програмного продукту в перспективі уможливіє автоматизацію обладнання при масовому виробництві плівкових нагрівних елементів. Оператором установки буде закладатися необхідний рівень властивостей кожного із шарів, а програма видаватиме параметри режиму, які необх-ідно встановити для їх одержання.

## Матеріали та методика дослідження

Об'єктом дослідження були діелектричні шари оксиду магнію (MgO), сформовані гібридною іонно-плазмовою розрядною системою на підкладках із різних конструкційних матеріалів [3].

У роботі застосовано комплексний підхід до побудови засобів прогнозування напруги пробією діелектричного ізоляційного шару, що ґрунтується на використанні інформації, отриманої одночасно за допомогою експеримен-тальних даних та висновків кваліфікованих експертів. Технологію побудови відповідних моделей подано на рис. 1.

Базовим елементом структурної схеми є T-Controller Workshop нечіткої логіки, в якому процес фазифікації (чіткому значенню ставляться у відповідність ступеня його приналежності до нечітких множин) та попередній етап побудови бази правил відповідає алгоритму Мамдані [4]:

- формування бази правил систем нечіткого виводу;
- фазифікація вхідних змінних;
- агрегування підумов, що передбачає процедуру визначення ступеня істинності умовної частини (дві підумови

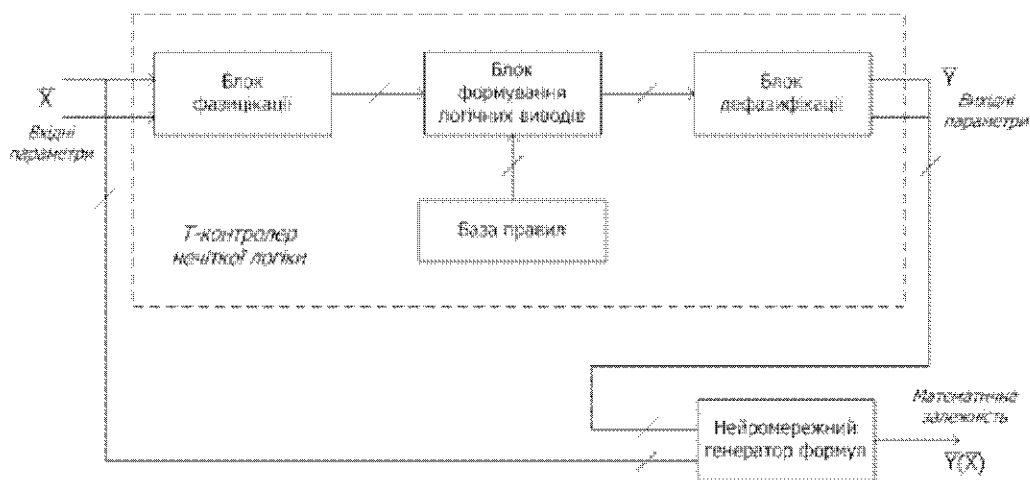


Рис. 1. Структурна схема контролера T-Controller Workshop нечіткої логіки

об'єднані за допомогою нечіткої логічної кон'юнкції) кожного з правил системи нечіткого виводу в нечітких правилах продукції;

- активізація підзаключень (процедура визначення ступеня істинності кожного з підзаключень правил систем нечіткого виводу) в нечітких правилах продукції;
- акумуляція (процедура знаходження функції приналежності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних множини) підсумків висновків нечітких правил продукції;
- дефазифікація (приведення до чіткості, яке використовується, коли корисно перетворити нечіткий набір висновків у чітке число) вихідних змінних [4].

Дефазифікація в T-Controller Workshop побудована за допомогою методу геометричних перетворень. Структура методу геометричних перетворень (МГП) скерована на усунення або зменшення негативних властивостей контролера нечіткої логіки [5].

На відміну від традиційних методів моделювання T-Controller Workshop забезпечує прозорі та зрозумілі правила, що описують даний процес, а також:

- підвищену точність функціонування і можливість розв'язання завдань із багатьма вхідними параметрами;
- високошвидкісний метод дефазифікації, що реалізований в даному контролері дозволяє отримати результат з нульовою методичною помилкою;
- число правил визначається лише властивостями вхідних і вихідних даних;
- побудова правил є зрозумілою (для експертів), оскільки дозволяє здійснювати логічний аналіз можливих значень для вихідних змінних.

Продукційна система T-Controller Workshop дозволяє створювати фази-контролери і застосовувати їх на числових даних. Даний контролер підтримує такі режими його створення: введення даних вручну та на основі файлу з даними (текстовий файл, у якому дані представлені без пропусків, а назви колонок та дані якого співпадають з файлом дослідної таблиці). У режимі введення даних вручну потрібно ввести всі вхідні параметри та відповідні їм терми (інтервальний поділ функції у вигляді low, middle та high) з координатами, а також вихідну змінну та терми які описують її. У режимі побудови контролера на основі файлу з даними потрібно ввести вхідні параметри з термами і вихідну змінну та терми, які описують її. Тоді за допомогою пункту меню «Data->Load» завантажити файл з даними, а після цього за допомогою пункту меню «Controller->Create from data» створити сам контролер. Після чого дана програма сама згенерує координати для термів вхідних змінних, координати термів та лінгвістичні правила для вихідної змінної [6].

### Теорія та аналіз отриманих результатів

Для моделювання складена дослідна таблиця з даними (табл. 1). На основі цієї таблиці створений контролер (рис. 2), який в результаті обробки дослідних даних утворив лінгвістичні правила, а також видав відповідний результат (рис. 3) та похибки, які описують його точність (MAD – середнє абсолютне відхилення; MAPE – середнє значення відносної похибки; R – коефіцієнт кореляції Пірсона; RMSE – середнє квадратичне значення похибки). Контролер створюється вручну введенням нових вхідних параметрів згідно з дослідною таблицею, введенням їх термів та координат, визначенням та введенням вихідного параметра та термів які описують його. У результаті на основі завантаженої таблиці за допомогою відповідного пункту меню «Controller->Create from data» створюється контролер.

Параметри, що використовували для створення контролера:

- товщина (**Thick**): мала (38.17,1) (44.5,0), середня (38.17,0) (44.5,1) (50.83,0), велика (44.5,0) (50.83,1);
- тиск (**Pressue**): низький (7.17,1) (7.5,0), середній (7.17,0) (7.5,1) (7.83,0), високий (7.5,0) (7.83,1);
- час (**Time**): малий (15.83,1) (19.5,0), середній (15.83,0) (19.5,1) (23.17,0), великий (19.5,0) (23.17,1);
- струм (**Current**): низький (33.33,1) (36,0), середній (33.33,0) (36,1) (38.67,0), високий (36,0) (38.67,1);
- шорсткість (**Ra**): мала (0.58,1) (1.35,0), середня (0.58,0) (1.35,1) (2.12,0), велика (1.35,0) (2.12,1);
- пористість (**Porystist**): мала (14.5,1) (23.5,0), середня (14.5,0) (23.5,1) (32.5,0), велика (23.5,0) (32.5,1).

У результаті обробки даної дослідної таблиці отримано такі параметри напруги пробією (**Voltage**) та її лінгвістичні правила, які описують умови її отримання:

- низька напруга (416.67,1) (550,0): товщина велика, тиск низький, час великий, струм високий, шорсткість висока, пористість велика або товщина мала, тиск низький, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість велика або товщина середня, тиск високий, час малий або струм низький, шорсткість мала, пористість велика;

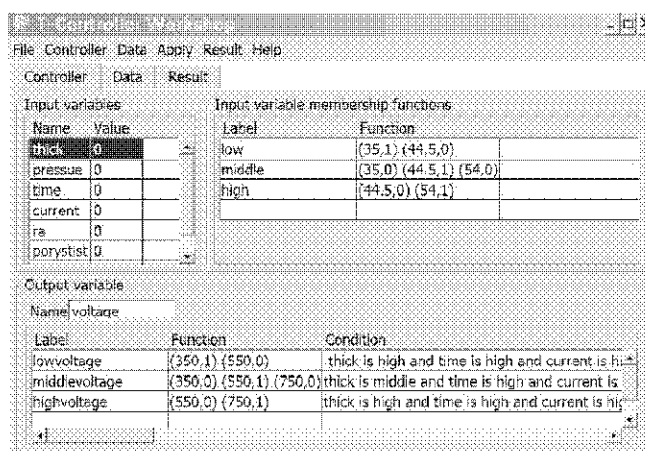
- середня напруга (416.67,0) (550,1) (683.33,0): товщина середня, тиск низький, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість велика або товщина середня, тиск низький, час великий, струм великий, шорсткість велика, пористість середня або товщина велика, тиск низький, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість середня або товщина велика, тиск високий, час малий, струм низький, шорсткість мала, пористість велика;

- висока напруга (550,0) (683.33,1): товщина велика, тиск низький, час великий, струм високий, шорсткість велика,

пористість низька або товщина середня, тиск високий, час середній, струм низький, шорсткість мала, пористість мала або товщина мала, тиск високий, час середній, струм низький, шорсткість мала, пористість мала.

**Таблиця 1** – Вхідні експериментальні дані діелектричного шару оксиду магнію

Товщина, мкм	Напруга пробою, В	Підкладка	P, мВ	Час, хв.	Струм, А	Ra, мкм	Пористість, %/см <sup>2</sup>
45	500	40X13	7	25	40	2,5	30
50	375	40X13	7	25	40	2,5	35
40	350	40X13	7	25	40	2,5	35
42	495	40X13	7	25	40	2,5	28
40	500	40X13	7	25	40	2,5	31
50	500	40X13	7	25	40	2,5	32
51	550	40X13	7	25	40	2,5	25
49	400	40X13	7	25	40	2,5	35
48	440	40X13	7	25	40	2,5	30
47	420	40X13	7	25	40	2,5	32
51	650	Д16	7	25	40	2,5	20
53	650	Д16	7	25	40	2,5	19
40	405	Д16	7	25	40	2,5	37
42	440	Д16	7	25	40	2,5	33
45	555	Д16	7	25	40	2,5	30
50	550	Cu	7	25	40	2,5	32
51	550	Cu	7	25	40	2,5	30
43	420	Cu	7	25	40	2,5	32
40	420	Cu	7	25	40	2,5	33
42	415	Cu	7	25	40	2,5	35
50	500	Аmг2	7,8	14	32	0,2	30
54	495	Аmг2	7,8	14	32	0,2	30
43	480	Аmг2	7,8	14	32	0,2	35
42	750	40X13	8	18	32	0,2	10
35	750	40X13	8	18	32	0,2	11
40	730	40X13	8	18	32	0,2	11



**Рис 2.** Інтерфейс контролера на основі дослідної таблиці

Controller	Data	Result	Measure	Value
Expected "voltage"		Predicted "voltage"		
500		539.47	MAD	61.67
375		434.15	MAPE	0.12
350		455.22	R	0.81
495		497.34	RMSE	70.13
500		455.22		
500		434.15		
550		527.78		
400		455.22		
440		476.28		
420		497.34		
650		601.85		
650		616.66		
405		455.22		
440		497.34		
555		539.47		
550		434.15		

**Рис 3.** Результати роботи контролера за експериментальними даними

На рис. 3 відображено результати роботи контролера, який був створений на основі експериментальних даних. Закладка «Result» висвітлює нам очікувану та прогнозовану напругу пробою. Очікувана напруга пробою висвітлюється нам такою ж самою, як у дослідній таблиці даних, тобто незмінною, а прогнозована напруга – це напруга, що результатом оцінена контролером, тобто яку ми мали б отримати в результаті проведення експерименту за реальних умов. Саме ці лінгвістичні правила враховують всі параметри, які впливають на напругу пробою.

Детальніше проаналізувавши закладку «Result», можна побачити на інтерфейсі програми графу «Errors», де зосереджені похибки, що характеризують прогнозовану напругу пробою, а саме:

- MAD (середнє абсолютне відхилення, %) становить 61,67;
- MAPE (середнє значення відносної похибки, %) становить 0,12;
- R (коефіцієнт кореляції Пірсона, %) становить 0,81;
- RMSE (квадратний корінь середнього квадратичного значення похибки, %) становить 70,13 [6].

Узагальнюючи вище сказане, можна зробити висновок, що похибка під час моделювання підтверджує коректність використання нейронних мереж, зокрема контролера нечіткої логіки, для моніторингу та прогнозування параметрів синтезування діелектричного шару, що забезпечуватимуть потрібний рівень властивостей.

Для здійснення подальшого навчання контролера на основі відкорегованих лінгвістичних правил потрібно вручну створити новий контролер (рис. 4). При цьому розрахувавши координати вхідних змінних (за побудовою функції приналежності для вхідних змінних) згенерувати відповідну таблицю з даними для подальшого опрацювання.

Нижче наведено процедуру створення контролера та результат його роботи на основі обробки вхідної відкоригованої таблиці з експериментальними даними (рис. 4).

Контролер створювався за такими параметрами:

- товщина (**Thick**): мала (35,1) (44.5,0), середня (35,0) (44.5,1) (54,0), велика (44.5,0) (54,1);
- тиск (**Pressue**): низький (7,1) (7.5,0), середній (7,0) (7.5,1) (8,0), високий (7.5,0) (8,1);
- час (**Time**): низький (14,1) (19.5,0), середній (14,0) (19.5,1) (25,0), великий (19.5,0) (25,1);
- струм (**Current**): низький (32,1) (36,0), середній (32,0) (36,1) (40,0), високий (36,0) (40,1);
- шорсткість (**Ra**): мала (0.2,1) (1.35,0), середня (0.2,0) (1.35,1) (2.5,0), велика (1.35,0) (2.5,1);
- пористість (**Porystist**): мала (10,1) (23.5,0), середня (10,0) (23.5,1) (37,0), велика (23.5,0) (37,1).

У результаті обробки відкоригованої таблиці з даними отримано наступні параметри напруги пробою (**Voltage**) та її лінгвістичні правила, які описують умови її отримання:

- низька напруга (350,1) (550,0): товщина велика, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість велика або товщина середня, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість велика або товщина середня, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість середня;

- середня напруга (350,0) (550,1) (750,0): товщина середня, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість середня або товщина велика, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість середня або товщина велика, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість велика або товщина велика, час малий, струм низький, шорсткість мала, пористість середня або товщина середня, час малий, струм низький, шорсткість мала, пористість велика;

- висока напруга (550,0) (750,1): товщина велика, час великий, струм високий, шорсткість велика, пористість середня або товщина середня, час середній, струм низький, шорсткість мала, пористість мала або товщина мала, час середній, струм низький, шорсткість мала, пористість мала.

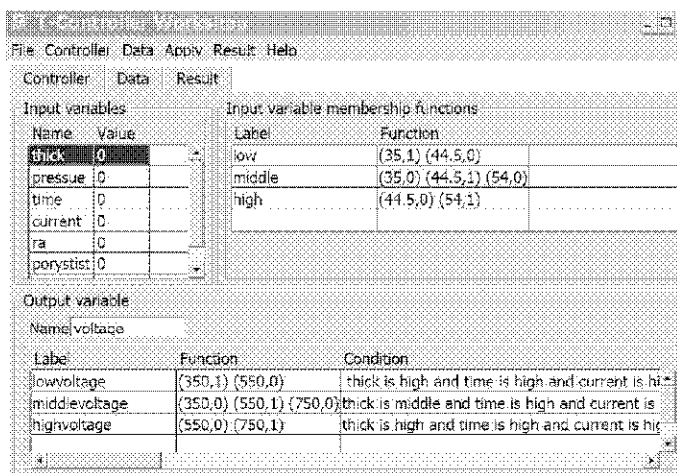


Рис. 4 Інтерфейс програми з процедурою створення контролера вручну за експериментальними даними

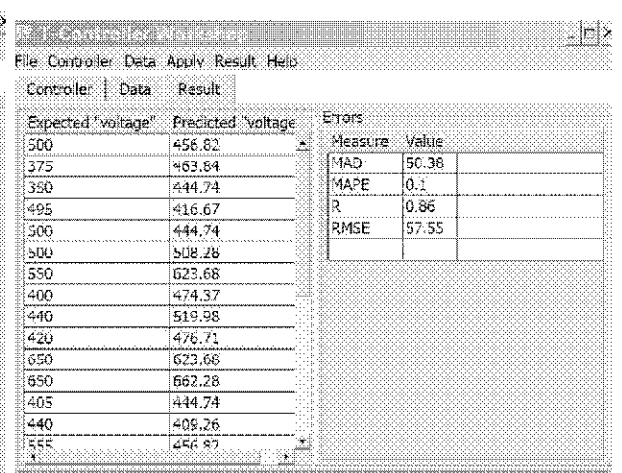


Рис. 5. Інтерфейс програми з результатами моделювання

У результаті моделювання закладка «Result» видає два типи напруги пробою: очікувану та прогнозовану. Легко бачити, що обидва показники по напрузі пробою мало відрізняються один від одного, на що вказують похибки моделювання (рис. 5).

Отже проведені дослідження показали, що процедура прогностичного моделювання повинна складатися з таких етапів: створення базового контролера на основі дослідної таблиці; створення робочого контролера на основі попередньо відкоригованої таблиці з даними та зміни бази лінгвістичних правил. У такий спосіб система «навчається» здійснювати моделювання з високою точністю на основі моніторингу експериментальних даних. У подальшому встановлені кореляційні залежності можна використовувати для постійного функціонування контролера в режимі інтелектуального давача, який сполучає функції імітації певних технологічних процесів, їхнього моделювання та управління ними.

### Висновки

1. Застосування програмного продукту IT-Controller Workshop дає змогу передбачити функціональні властивості об'єкта моделювання, зокрема, напруги пробою діелектричного шару на основі обробки вхідних експериментальних даних. Використання нейромережевого моделювання з побудовою функцій приналежності (терм змінних та їх координат) дозволяє сформулювати та формалізувати правила логічного виведення на інтерфейс програмного забезпечення. Це дає змогу наочно проаналізувати результати дослідження за допомогою закладки «Result» та похибок, які відповідають цим результатам. Процедура навчання контролера підвищує точність результатів експерименту, які б мали виконуватись за реальних або дуже наближених до реальних умов.

2. Автоматична побудова логічних правил на основі використання функціональних можливостей T-Controller Workshop забезпечила високу ефективність навчання контролера і одночасно дозволила встановити лінгвістичний опис взаємозв'язків між основними параметрами технологічного процесу формування діелектричних шарів.

3. Для зменшення похибки прогнозування значень напруги пробою необхідно корегувати лінгвістичні правила, за якими будується контролер.

### Список літератури

1. Дослідження діелектричних шарів на конструкційних матеріалах сформованих гібридною іонно-плазмовою розрядною системою / [З. А. Дурягіна, С. А. Беспалов, В. Я. Підкова, Д. Полоцький] // *Металлофиз. новейшие технол.* – 2011. – Т. 33, С. 393–400.
2. Дурягіна З. А. Методика нанесення захисних ізоляційних покриттів на сталі 40X13 / З. А. Дурягіна, В. Я. Підкова, С. А. Беспалов // *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів* : в 2-х т. / Спецвипуск ФХММ. – 2012. – №9. – Т. 2. – С. 506–510.
3. Установка для формирования наноструктур / [Короташ И., Одинокое В., Павлов Г. и др.]. – *Наноиндустрия*, 2010. – № 4. – С. 14–18.
4. <http://habrahabr.ru/post/113020/>
5. Ткаченко Р. Нейроподібні структури машини геометричних перетворень у завданнях інтелектуального аналізу даних / Р. Ткаченко, А. Дорошенко // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»* : Сер. : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2009. – С. 179–184.
6. Olexij Tkatchenko. T-Controller Workshop User Manual. – Vol. 2.8, 2011. – 16 с.

*Одержано 31.10.2012*

© Ткаченко Р.О., Дурягіна З.А., Зубик-Шах О.О., Підкова В.Я., Ольшевська С.О.

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

**Tkachenko R., Duryagina Z., Zubik-Shah O., Pidkova V., Olshevskaya S.  
Monitoring the properties of heating elements dielectric layer neuro-network modeling**