

## КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОПОРНО-СТРИЖНЕВИХ ІЗОЛЯТОРІВ

*М. П. Лабзун, інж.*

*Південно-Західна електроенергетична система*

*вул. І. Богуна, 5, 21100, м. Вінниця, Україна*

*E-mail: sgi-semch@rdcm.sw.energy.gov.ua*

*В. М. Кутін, д.т.н., проф.*

*Вінницький національний технічний університет*

*Хмельницьке шосе, 95, 21021, Вінниця, Україна*

Розроблено математичну модель комплексного методу контролю технічного стану опорно-стрижневих ізоляторів, яка формалізована за допомогою таблиці станів. Розроблено алгоритм побудови дерев рішень варіантів комплексного методу контролю та вибір оптимального дерева за сукупністю критеріїв надійності, ціни та тривалості контролю.

**Ключові слова:** таблиця станів, дерево рішень.

**Вступ.** Велика кількість видів дефектів опорно-стрижневих ізоляторів (ОСІ), різні умови та швидкість їх розвинення вимагають застосування декількох методів контролю технічного стану. Використання окремо будь-якого з методів контролю технічного стану ОСІ не забезпечує потрібної продуктивності контролю з необхідним рівнем умовної ймовірності виявленої несправності [1].

**Аналіз попередніх досліджень.** Організація системи контролю технічного стану ОСІ передбачає комплексне використання методів, яке забезпечує оптимальне вирішення проблеми продуктивності контролю та забезпечення необхідного рівня умовної ймовірності виявленої несправності під час контролю. На даний час проблема комплексного контролю ОСІ не вирішена, а в експлуатації проводяться окремо лише візуальний контроль та контроль ультразвуковими методами [2].

**Мета роботи.** Формалізація математичної моделі комплексного методу контролю. Розробка алгоритму побудови можливих дерев рішень та вибір оптимальних дерев рішень за сукупністю параметрів надійності, ціни та тривалості контролю.

**Матеріал і результати дослідження.** Для створення комплексного методу проведено оцінку ефективності методів, які доцільно використовувати для контролю ізоляторів на основі достовірності виявлення дефектів та їх небезпечності [1].

До ефективних методів контролю ізоляторів відносяться:

- візуальний контроль – ВК (П1);
- контроль засобами ІЧТ – ТВК (П2);
- ультразвукова структурометрія та дефектометрія – УЗК (П3);
- випробування силовими методами, в тому числі з ресстрацією сигналів акустичної емісії – АЕ (П4).

Дефектні стани ізоляторів та ефективні методи їх контролю наведено в табл. 1.

**Таблиця 1 – Дефектні стани ізоляторів та ефективні методи їх контролю**

Стан	Вид дефекту	Методи контролю
S2	Видимі тріщини фарфору або фланців	ВК, УЗК, ТВК, АЕ

**Продовження табл. 1**

S3	Внутрішні тріщини та зони розтріскування	ТВК, УЗК, АЕ
S4	Наявність зони відкритої мікроскопічної пористості	ТВК, УЗК
S5	Обпалювальна та засмічена макроскопічна пористість	УЗК, АЕ
S6	Дефекти поверхні фарфору або цементного шва	ВК
S7	Дефекти, викликані механічною втомою тощо	АЕ

Формалізуємо комплексний метод контролю ОСІ матрицею інцидентів (табл. 2), тобто таблицю функцій справного S1 та дефектних станів ізолятора [3] в залежності від можливості визначення стану ізолятора різними методами контролю, в якій позначено: 1 – метод дозволяє виявити дефект даного виду, 0 – не дозволяє.

**Таблиця 2 – Таблиця функцій станів**

Стан \ Метод	П1	П2	П3	П4
S1	0	0	0	0
S2	1	1	1	1
S3	0	1	1	1
S4	0	1	1	0
S5	0	0	1	1
S6	1	0	0	0
S7	0	0	0	1

Введемо ряд припущень:

1. Стан ізолятора характеризує більш критичний дефект у пріоритетах за станами: 2, 3, 4, 5, 6, 7.

2. Дефектні ізолятори різних видів розподілені рівномірно в загальній кількості, тобто відсутні явно дефектні партії.

3. Кількість ОСІ, які експлуатуються в енергосистемі, постійна.

Для ідентифікації конкретного стану ОСІ побудуємо таблицю перекриття пошуку дефектів (табл. 3), яка є формалізацією логічної функції розрізнення двох станів різними методами на основі диз'юнкції даних таблиці станів за формулою (1).

$$S_{mj} \cdot S_{nj} = S_{mj} \vee S_{nj}, \quad (1)$$

де  $S_{mj}$ ,  $S_{nj}$  – значення в таблиці станів, які відповідають  $j$  методу контролю для станів  $m$  та  $n$  відповідно.

**Таблиця 3 – Таблиця перекриття пошуку дефектів**

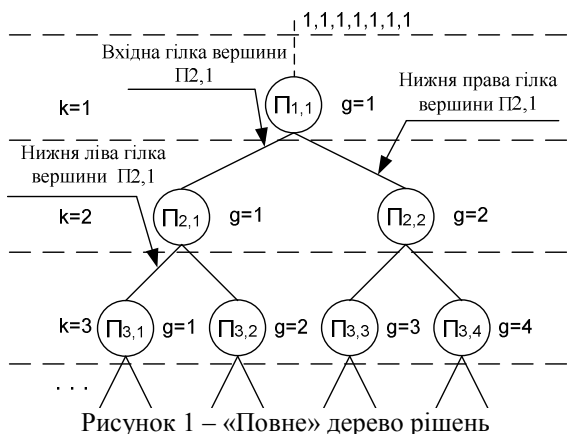
Стан \ Метод	П1	П2	П3	П4
S1S2	1	1	1	1
S1S3	0	1	1	1
S1S4	0	1	1	0
S1S5	0	0	1	1
S1S6	1	0	0	0
S1S7	0	0	0	1
S2S3	1	1	1	1
S2S4	1	1	1	1
S2S5	1	1	1	1
S2S6	1	1	1	1
S2S7	1	1	1	1
S3S4	0	1	1	1
S3S5	0	1	1	1
S3S6	1	1	1	1
S3S7	0	1	1	1
S4S5	0	1	1	1
S4S6	1	1	1	0
S4S7	0	1	1	1
S5S6	1	0	1	1
S5S7	0	0	1	1
S6S7	1	0	0	1

Згідно з даними табл. 2 та 3 відбувається перекриття всіх рядків дефектних станів, тобто таблиці є логічно повними для дефектних станів.

Крім того, існує ряд дефектних станів – «виключень», які можуть розрізнятися між собою одним методом контролю:

- візуальний контроль (П1) дозволяє розрізняти між собою візуальні тріщини (S2) від дефектів поверхні та викришування цементного шву (S6);
- ультразвуковий контроль (П3) дозволяє розрізняти між собою стани S3 та S4, S2 та S3, S2 та S4, S3 та S5, S4 та S5, і S3, S4, S5 між собою.

Розробимо універсальний для даного класу задач алгоритм побудови дерев рішень. При розробці алгоритму побудови дерева рішень будемо використовувати позначення «повного» дерева, яке показано на рис. 1.



Рівень вершини  $k$  позначається зверху вниз, номер вершини  $g$  – зліва направо для вершин даного рівня, номер методу  $j$  рахується за методами в порядку ВК, ТВК, УЗК та АЕ. Вхідною гілкою вершини вважаються вхідні стани у вершину, які представляються у двійковому вигляді: 1; 0. Вхідною гілкою верхньої вершини є всі 1. Поточним відгалуженням вважається сукупність всіх вершин і гілок від поточної вершини або гілки до першої (верхньої) вершини.

Рядок станів у лівій  $L_i$  та в правій  $R_i$  вихідних гілках стану розраховується як добуток відповідних елементів рядку станів вхідної гілки поточної вершини дерева  $V_i$  на рядок матриці інцидентів  $S_{ij}$  та на інверсний рядок матриці інцидентів відповідно для методу  $j$  у поточній вершині за формулами:

$$L_i = S_{ij}V_i; \quad (2)$$

$$R_i = \bar{S}_{ij}V_i. \quad (3)$$

Побудова одного логічного дерева виконується за допомогою рекурсивної процедури [4] формування будь-якої вершини дерева та переходу по гілках дерева.

Формування вершини дерева складається з наступних етапів:

1. Перевірка, чи не є вхідна гілка кінцевою, тобто такою, в якій залишився або один стан, або «виключення» за умови виконання методу, який їх ідентифікує в даному відгалуженні – шляхові від даної гілки до першої (верхньої) вершини дерева.
2. Вибір методу контролю ОСІ (значення вершини) та формування станів у нижніх (вихідних) гілках за наступними принципами:
  - метод не використовувався в поточному відгалуженні – вище по дереву, по гілках від вершини дерева, що розглядається, до першої вершини;
  - метод не дає «нульових» гілок, тобто і в праву, і в ліву гілку переходить хоча б один стан.
3. Якщо гілка не кінцева, то відбувається формування станів у нижніх гілках вершини як добуток рядків матриці інцидентів та станів у вхідній гілці.

Ідея побудови всього дерева наступна:

1. Виконується побудова вершин по лівим гілкам від верхньої вершини до крайньої нижньої лівої вершини за умови, що гілка не кінцева.
2. У разі, якщо ліва гілка є кінцевою за умовою одного стану в гілці або «виключень», виконується перехід на праву гілку поточної вершини.
3. При побудові вершини, в якій ліва та права нижні гілки є кінцевими, вхідна гілка даної вершини позначається як кінцева та виконується перехід на верхній рівень до вершини в поточному відгалуженні.
4. Процедура виконується до моменту кінцевості лівої та правої гілок першої вершини.

На основі першого побудованого дерева формується таблиця вершин (табл. 4), рядки якої відповідають рівневі від верхньої вершини дерева вниз, а стовпці – номеру вершини зліва направо на даному рівні, а значення елементів таблиці – номеру методу контролю ОСІ.

**Таблиця 4 – Приклад таблиці вершин дерева рішень**

1							
0	2						
0	0	3	3				
0	0	0	0	0	0	0	4

Також формується таблиця проходження з аналогічною структурою, але зі значеннями елементів, які відповідають кількості змін значень у вершині дерева при незмінній конфігурації інших відгалужень та значень вершин верхніх рівнів дерева. На початковому етапі елементи, які відповідають «ненульовим» вершинам, у дереві позначаються 1.

Побудова всіх можливих дерев рішень основана на мінімізації кількості виконання процедур для побудови наступного дерева та полягає в тому, що наступне дерево формується не шляхом побудови дерева спочатку, а зміною значень лише однієї вершини, якщо її гілки кінцеві, або однієї вершини у верхніх рівнях дерева та вершин, що побудовані вниз від поточної вершини, в залежності від рівня вниз по дереву, на якому відбувається зміна значення вершини.

Принцип побудови всіх дерев наступний:

1. Після побудови першого дерева воно заноситься в таблицю результатів та формуються таблиця вершин дерева рішень та таблиця проходження.

2. У таблиці проходження вибирається крайній правий нижній «ненульовий» і не «виконаний» (для якого невиконані всі проходження) елемент, який позначається kmax, gmax.

3. Для вершини виконується пошук наступного за встановленим у таблиці вершин «успішного» методу контролю, який задовольняє умовам побудови (вибір методу контролю ОСІ), при цьому при аналізі кожного наступного методу значення поточного елементу в таблиці проходження збільшується на 1.

4. Якщо «успішний» метод знайдено, то нове дерево заноситься в масив побудованих дерев.

5. В іншому разі, якщо «успішний» метод не знайдено, поточний елемент у таблиці проходження позначається як «виконаний» та відбувається перехід до крайньої правої нижньої «ненульової» і не «виконаної» вершини, яка знаходиться лівіше поточної по дереву, та виконується крок 3.

6. Якщо «успішний» метод знайдено, то це значення заноситься до таблиці вершин, а значення елементів, які знаходяться правіше та нижче поточної вершини, значення елементів в таблиці проходження, в тому числі позначених «виконаними», встановлюються 1, а значення відповідних елементів у таблиці вершин встановлюються рівними значенню першого дерева. Нове дерево заноситься в масив побудованих дерев. На наступному етапі процедура 2–6 повторюється.

7. За умови досягнення крайньої лівої «ненульової» і не «виконаної» вершини та поточному рівні, коли всі елементи рівня є «виконаними», виконується перехід на крайній правий елемент верхнього рівня та повторюються кроки 3, 6.

8. У разі знаходження наступного «успішного»

значення вершини на верхніх рівнях, вершини нижніх рівнів у відгалуженнях даної вершини будуються заново, значення «ненульових» вершин у таблиці проходження змінюється на 1, а таблиці вершин – на параметри першого дерева.

9. Виконання процедури закінчується, якщо значення верхньої вершини дерева в таблиці проходження набуває значення «виконано».

Результатом роботи програми за описаними алгоритмами є масив дерев рішень з 63 дерев для роз'єднувачів 35–110 кВ та з 6 дерев для іншого обладнання. При цьому розглядається два варіанти масиву: для ОСІ в складі роз'єднувачів 35–110 кВ, де можливе використання силових випробувань (АЕ), та для ОСІ в складі іншого обладнання.

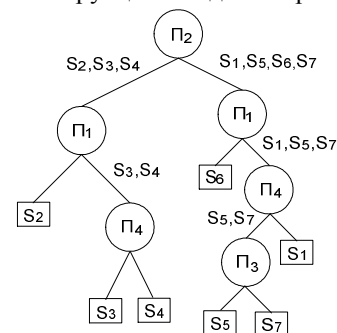
У багатоповерхових конструкціях (обладнання 330 кВ і вище) та в шинних опорах будь-якого класу напруги стан S7 – наявність в ОСІ дефектів, викликаних механічною втомою фарфору, або наявність зосереджених дефектів у ствольній частині ОСІ існуючими методами виявити неможливо. Матриця інцидентів у цьому випадку набуває вигляду табл. 5.

**Таблиця 5 – Таблиця функцій станів для багатоповерхових конструкцій**

Стан \ Метод	П1	П2	П3
S1	0	0	0
S2	1	1	1
S3	0	1	1
S4	0	1	1
S5	0	0	1
S6	1	0	0

Схеми проведення комплексного контролю ОСІ суттєво відрізняються одна від одної, при цьому важливою діагностичною інформацією є як виявлення дефектів та їх ідентифікація за видом дефекту, так і визначення бездефектного стану ОСІ.

Для пошуку оптимального з побудованих дерев рішень в якості основного критерію оптимальності будемо використовувати ймовірність помилки 1-го роду при використанні комплексного контролю за планом, що відповідає тому чи іншому дереву рішень. Для вибору найбільш оптимального серед отриманих оптимальних дерев введемо додаткові критерії: ціну контролю ізолятора, тривалість перевірки, ймовірність помилки 2-го роду (помилкового відбракування). Отримані оптимальні дерева для ОСІ різних конструкцій наведені на рис. 2, 3.



**Рисунок 2 – Оптимальне дерево для ОСІ у складі роз'єднувачів 35–110 кВ**

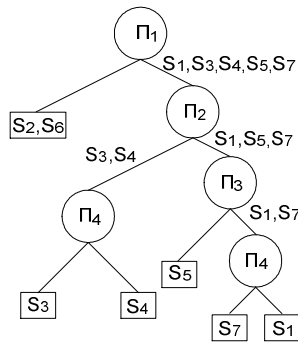


Рисунок 3 – Оптимальне дерево рішень для ОСІ у складі багатоповерхових конструкцій

**Висновки.** На основі аналізу можливих дефектних та бездефектних станів ізолятора сформовано математичну модель комплексного контролю ОСІ у вигляді матриці інцидентів та таблиці перекриттів.

Розроблено та програмно реалізовано універсальний для даного класу задач алгоритм побудови дерев рішень – планів виконання комплексного контролю ОСІ.

За сукупністю критеріїв: ймовірність помилок 1-го та 2-го роду, ціна та тривалість контролю –

вибрано оптимальні дерева рішень для варіантів контролю ОСІ у складі роз'єднувачів 35–110 кВ та ОСІ у складі іншого обладнання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Лабзун М.П., Рубаненко О.Є., Кутін В.М. Методи та засоби діагностування опорно-стержневих ізоляторів. Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 272 с.
2. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – Офіц. Вид. – К. ГРІФРЕ: М-во палива та енергетики України, 2007. – 262 с.
3. Кутін В.М., Кульматицький О.І. Діагностування електричних розподільних мереж. – К.: Техніка, 1993. – 160 с.
3. Р.Беллман, С.Дрейфус. Прикладные задачи динамического программирования. – М: Наука, 1965. – 460 с.

Стаття надійшла 30.06.2011 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Чорним О.П.

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНО-СТЕРЖНЕВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

*М. П. Лабзун, инж.*

*Юго-Западная электроэнергетическая система*

*ул. И. Богуня, 5, 21100, г. Винница, Украина*

*E-mail: sgi-semch@rdcm.sw.energy.gov.ua*

*В. М. Кутин, д.т.н., проф.*

*Винницкий национальный технический университет*

*ул. Хмельницкое шоссе, 95, 21021, г. Винница, Украина*

Разработана математическая модель комплексного метода контроля опорно-стержневых изоляторов, формализованная с помощью таблицы состояний. Разработан алгоритм построения деревьев решений вариантов комплексного метода контроля и выбор оптимального дерева по совокупности критериев надежности, цены и продолжительности контроля.

**Ключевые слова:** таблица состояний, дерево решений.

## COMPLEX METHOD OF ISOLATORS TECHNICAL CONDITION ESTIMATION

*M. Labzun, eng.*

*South-Western Energy Electrical System*

*vul. I. Bogunya, 5, 21100, Vinnitsa, Ukraine*

*E-mail: sgi-semch@rdcm.sw.energy.gov.ua*

*V. Kutin, D.Sc. (Eng.), Prof.*

*Vinnitsa National Technical University*

*Khmelnytske shose, 95, 21021, Vinnytsya, Ukraine*

The mathematical model of a complex quality monitoring of isolators formalized with the help of the table of conditions is developed. The algorithm of construction of trees of decisions of variants of a complex quality monitoring and choice of an optimum tree on set of criteria of reliability, the price and duration of the control is developed.

**Key words:** the table of conditions, a tree of decisions.