

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра ЕСС

**Магістерська кваліфікаційна робота  
на тему:**

**«ВИБІР СУКУПНОСТІ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ  
РОБОТОЗДАТНОСТІ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ»**

Виконав:  
Ст.гр. ЕСМ-18м  
Баньковський І. Ю.

Керівник :  
д.т.н.професор Кутін В.М.

# АКТУАЛЬНІСТЬ

Найбільш поширеним видом пошкоджень в РМ ПЛЕП є замикання на землю, які складають 60-90%, від усіх видів пошкоджень. Їх поява призводить до виникнення небезпеки ураження людей струмом, до суттєвого зниження, якості і надійності електропостачання, виникнення в РМ значних понаднормативних технічних втрат електроенергії. Основною причиною виникнення замикань на землю є утворення шунтувальних зв'язків між струмоведучими частинами РМ і землею. Існуючі методи, основані на періодичному випробуванні ізоляції підвищеною напругою, через невисоку чутливість не дозволяють виявляти пошкодження ізоляції відносно землі на ранніх стадіях їх розвитку.

Тому важливим є вдосконалення визначення умов роботоздатності ізоляції в процесі експлуатації, а також розробка і впровадження в РМ досконалих методів діагностування технічного стану ізоляції, які дозволяють виявити пошкодження на ранніх стадіях їх розвитку під робочою напругою.

# МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Мета** даної магістерської роботи є визначення умов роботоздатності ізоляції повітряних розподільних мереж шляхом врахування параметрів електробезпеки і витікання струму на землю в умовах експлуатації.

## **Задачі МКР:**

- аналіз об'єкта дослідження (характер пошкодження, причини пошкоджень);
- аналіз існуючих методів і засобів підвищення надійності контролю ізоляції;
- дослідження діагностичної моделі для визначення умов роботоздатності ізоляції РМ;
- аналіз методики розрахунку економічної ефективності використання діагностичного комплексу контролю роботоздатності ізоляції РМ відносно землі;
- дослідження заходів з охорони праці під час електромонтажних робіт в мерерах 6-35 кВ.

**Об'єктом дослідження** є процеси зміни технічного стану елементів в РМ.

**Предметом дослідження** є діагностична модель для визначення умов роботоздатності ізоляції РМ та розробка методу неперервного пофазного контролю ізоляції РМ відносно землі.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ



Любий ізоляційний матеріал, такий як скло чи глазурована порцеляна, має поверхневу і об'ємну провідності, які викликають появу струмів витоку вздовж поверхні чи об'єму діелектрика. Нерівномірність забруднення призводить до виникнення неоднорідності у розподілі падіння напруги вздовж поверхні ізолятора і виникнення часткових розрядів.

Скло має властивість утворювати при зростанні вологості повітря адсорбційну плівку, в якій під дією підвищеної температури може відбуватись процес гідролізу і утворення кремнієвої плівки, що значно підвищує абсорбційні властивості поверхні. Це призводить до різкого збільшення поверхневої провідності і струму витоку вздовж поверхні ізолятора.



# АНАЛІЗ ПРИЧИН ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ

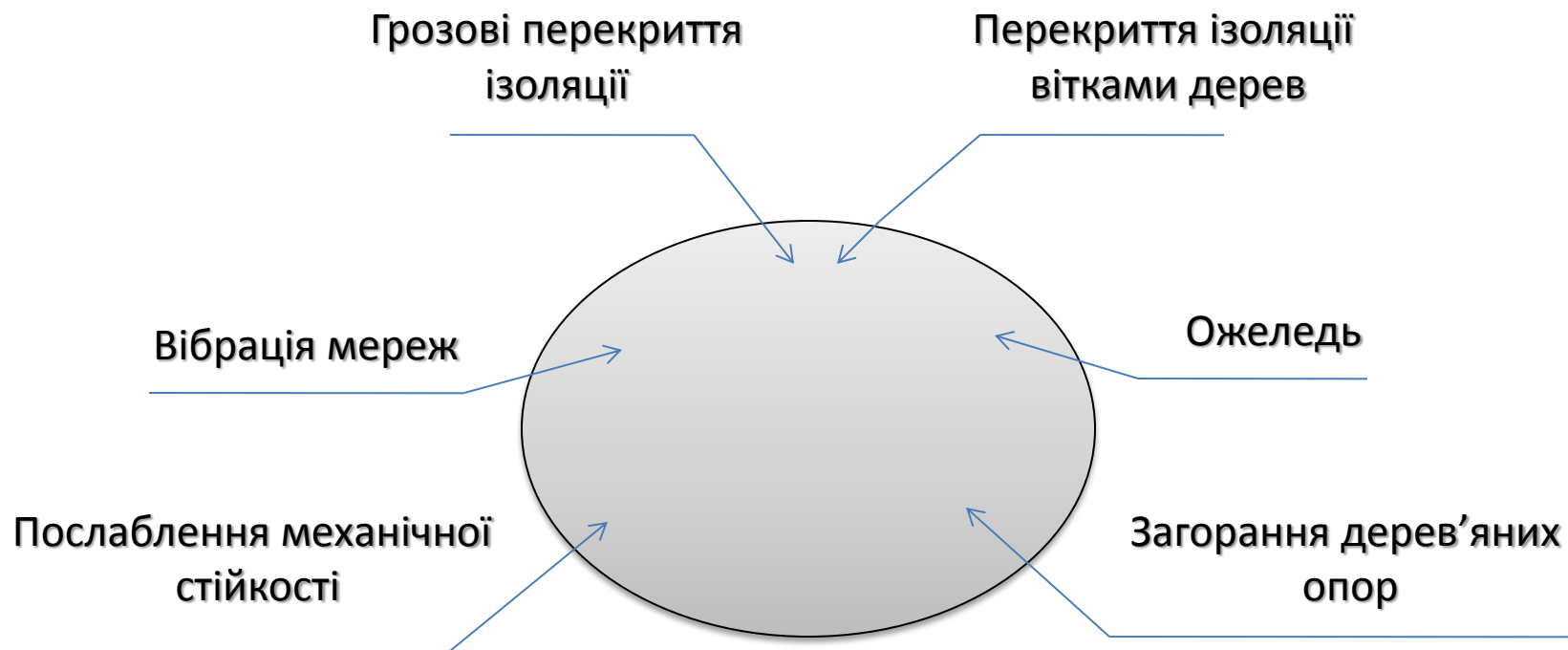


Рисунок 1 – Фактори, які впливають на зміну технічного стану ізолятора

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІНФОРМАЦІЇ

Методи контролю	Функціональний	Тестовий	Комбінований
Періодичність контролю	Неперервний	Періодичний	Неперервний та періодичний
Види сигналів, що використовуються	Вимірювання робочих сигналів	Накладання зовнішніх джерел енергії, введення додаткової провідності	Вимірювання робочих сигналів. Дублювання експерименту шляхом накладання сигналів сторонніх джерел живлення
Контрольовані величини	$U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_0$	$U_{xx}, I_{k.з.}$ , введення додаткових провідностей та вимірювання струму провідності і фазних напруг; накладання постійного та змінного сигналу $f < 50$ Гц	$U_A, U_B, U_C, U_0$ та струму через додаткову провідність, або сигналу постійного чи змінного струму $f < 50$ Гц зовнішнього джерела живлення
Недоліки	Складність розрахунку за результатами вимірювання величин	Похибки через неспівпадаючі в часі вимірювання	Складність реалізації засобів проведення експерименту

# Визначення умов роботоздатності PM



# Вибір критеріїв для оцінювання умов роботоздатності

1. Обмеження струму, що протікає через тіло людини величиною 6 мА в мережах де тривалість дії захисту від ОЗЗ перевищує 1 с.

2. При визначенні напруги дотику і струму через тіло людини при частоті 50 Гц, тіло людини в електричному ланцюзі модулюється резистором з опором: при тривалості дії захисту від ОЗЗ до 1 с -1 кОм, більше 1 с 6 кОм.

3. потужність втрат електроенергії від струмів стікання на землю

$$\Delta P_{iz\dot{a}} = \Delta P_{izA} + \Delta P_{izB} + \Delta P_{izC} = U_A^2 \cdot g_a + U_B^2 \cdot g_b + U_C^2 \cdot g_c.$$

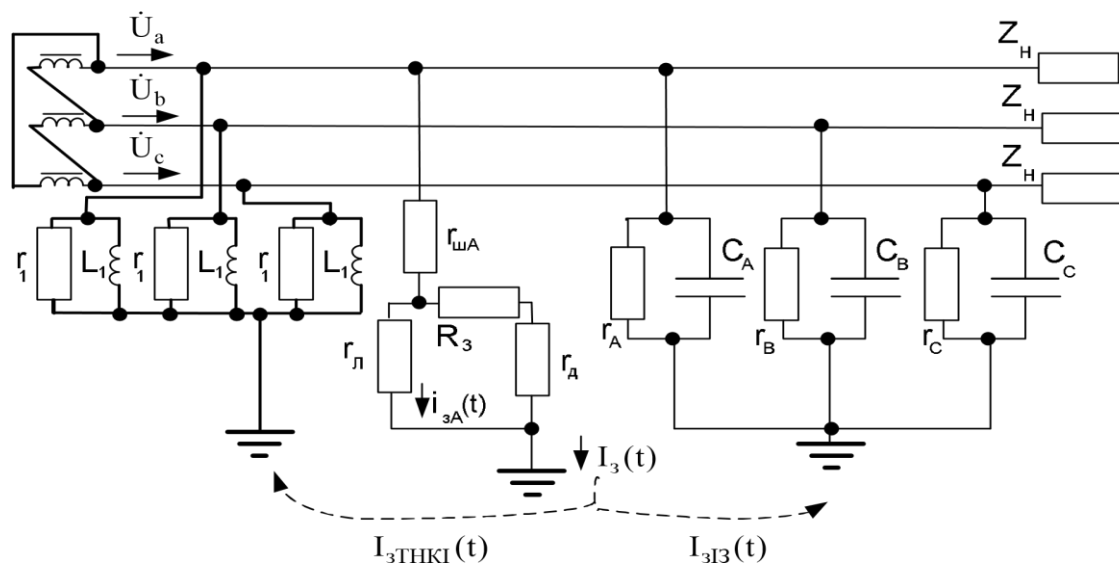
Отримане значення потужності втрат в ізоляції  $\Delta P_{iz\Sigma}$  порівнюється з нормативним  $\Delta P_{iz}^{norm}$ , яке попередньо розраховують знаючи конструктивне виконання (ПЛ, КЛ), загальну довжину, номінальну напругу, згідно існуючої методики.

$$\Delta P_{iz\Sigma} \leq \Delta P_{iz}^{norm}$$

Згідно з методикою виділяють три стани навколишнього середовища: 1) дощ, мокрий сніг, морось (вологість 100%); 2) туман (вологість 80-100%); 3) роса, погода без опадів (вологість 80% і нижче).



## Заступна схема для опису процесу виникнення шунтувального зв'язку в РМ і дотику людини до заземлених елементів електроустановки



Задача вибору показників технічного стану ізоляції полягає у розгляді всіх можливих електротехнічних характеристик ізоляції, виходячи з аналізу на основі вибраних критеріїв (безпеки експлуатації і економічності функціонування).

# ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ

Математичної моделі критерію безпеки для визначення роботоздатності ізоляції має вигляд:

$$\begin{cases}
 I_{3A} = \frac{g_{шA} \cdot g_{л}}{g_{шA} + g_{л} + g_{з}} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[ g_b + g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_b + g_c}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}; \\
 I_{3B} = \frac{g_{шA} \cdot g_{л}}{g_{шB} + g_{л} + g_{з}} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}, \\
 I_{3C} = \frac{g_{шA} \cdot g_{л}}{g_{шC} + g_{л} + g_{з}} \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2}.
 \end{cases} \quad (1)$$

Математична модель критерію економічності функціонування для визначення роботоздатності ізоляції матиме наступний вигляд:

$$\begin{cases}
 \Delta P_{ізA} = \frac{2,25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \left[ \left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right] \\
 \Delta P_{ізB} = \frac{2,25 \cdot U_f^2 \times g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \left[ \left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right] \\
 \Delta P_{ізC} = \frac{2,25 \cdot U_f^2 \cdot g_a}{\sqrt{(g_a + g_b + g_c)^2 + (\omega(C_a + C_b + C_c) - B_L)^2}} \times \\
 \times \left[ \left[ g_a + g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}}(C_c - C_b) \right]^2 + \left[ \frac{g_a + g_b}{\sqrt{3}} + \omega(C_b - C_c) - \frac{2B_L}{3} \right]^2 \right]
 \end{cases} \quad (2)$$

# Діагностичне моделювання для визначення умов роботоздатності

$$W_X(i\omega) = \frac{U_x}{U_f}$$

$$(1) \quad a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0.$$

$$(4)$$

$$W_A(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_b + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{j30^\circ} + (g_c + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-j30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)};$$

$$W_B(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_c + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{j30^\circ} + (g_a + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-j30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)};$$

$$W_C(i\omega) = \frac{\sqrt{3} \cdot \left[ (g_a + i\omega \cdot C_b) \cdot e^{j30^\circ} + (g_b + i\omega \cdot C_c) \cdot e^{-j30^\circ} \right]}{(g_a + g_b + g_c) + i\omega \cdot (C_a + C_b + C_c)}.$$

$$(2)$$

$$W(p) = \frac{\sqrt{3} \cdot (a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0)}{(g_a + g_b + g_c)^2 + \omega^2 \cdot (C_a + C_b + C_c)^2},$$

$$(3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_3 = - \left[ \frac{1}{2 \cdot w} \cdot (C_b + C_c) \cdot (C_a + C_b + C_c) \right]; \\ a_2 = \frac{1}{2 \cdot w} \cdot (C_b + C_c) \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \left[ \frac{1}{2 \cdot w} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_1 = \left[ \frac{1}{2 \cdot w} \cdot (g_b + g_c) + \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (C_b + C_c) \right] \cdot (g_a + g_b + g_c) - \\ - \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b + g_c) \cdot (C_a + C_b + C_c); \\ a_0 = \frac{1.5}{\sqrt{3}} \cdot (g_b + g_c) \cdot (g_a + g_b + g_c). \end{array} \right. \quad (5)$$

# Інформаційна оцінка вибраної сукупності показників

Оцінивши об'єм інформації який дає кожний показник можна визначити ймовірність  $P(v)$  правильної оцінки дійсного технічного стану об'єкта, яка досягається при здійсненні вибраної категорії перевірок. При визначенні  $P(v)$  враховують вагу кожного показника в оцінці ТС по чутливості  $S_i$  до зміни параметра і технічну реалізацію об'єкта, тобто тип елементів і спосіб їх з'єднання. Кожен елемент характеризується ймовірністю безвідмовної роботи  $P_i$ , або  $K_i=1/P_i$ , тобто

$$P(v) = \frac{\sum_{i=1}^m k_i S_i}{\sum_{i=1}^n k_i S_i}$$

де  $m$  – кількість контрольованих показників;

$n$  – загальна кількість.

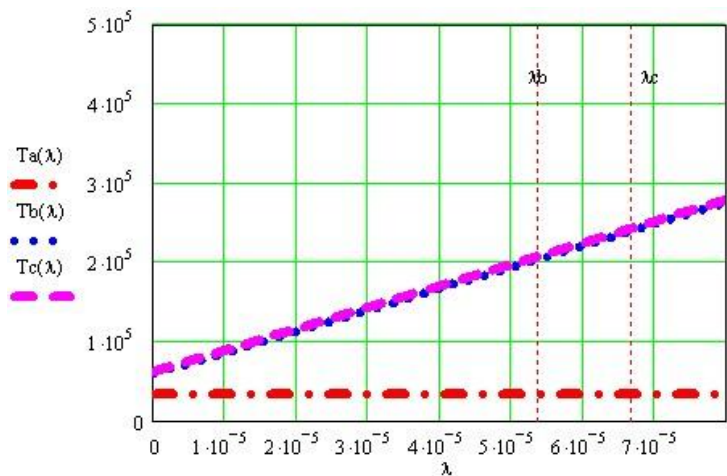
Спочатку визначають міру невизначеності:  $H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i = \log_2 n$

Потім інформацію, яку несе кожний показник:  $I(m) = H - H(m)$

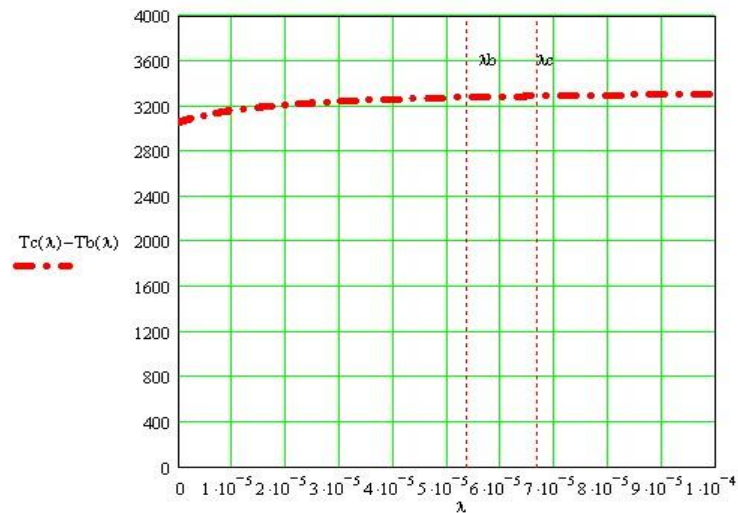
$$H(m) = P(v) \log_2 P(v) + (1 - P(v)) \log_2 (1 - P(v))$$

Рекомендується використовувати таку сукупність показників, яка має  $P(v) > 0,5$

# ПЕРЕВІРКА ІНФОРМАТИВНОСТІ ВИБОРУ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



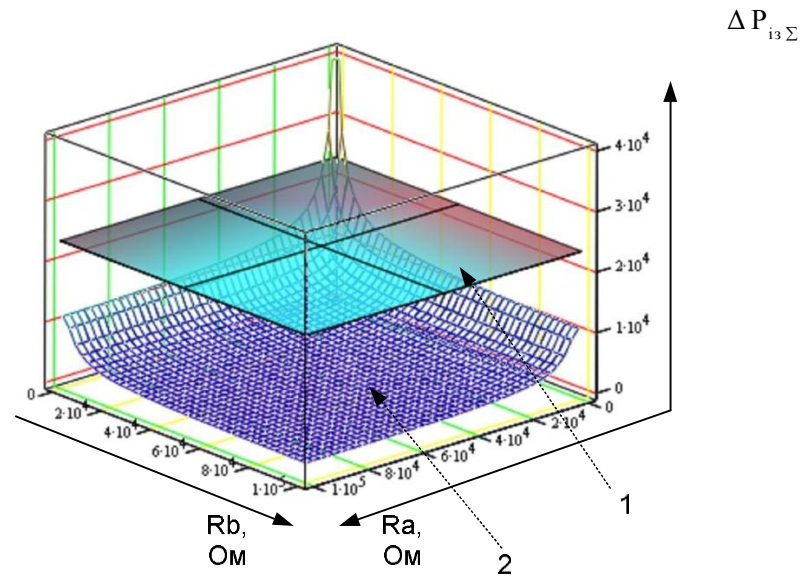
а)



б)

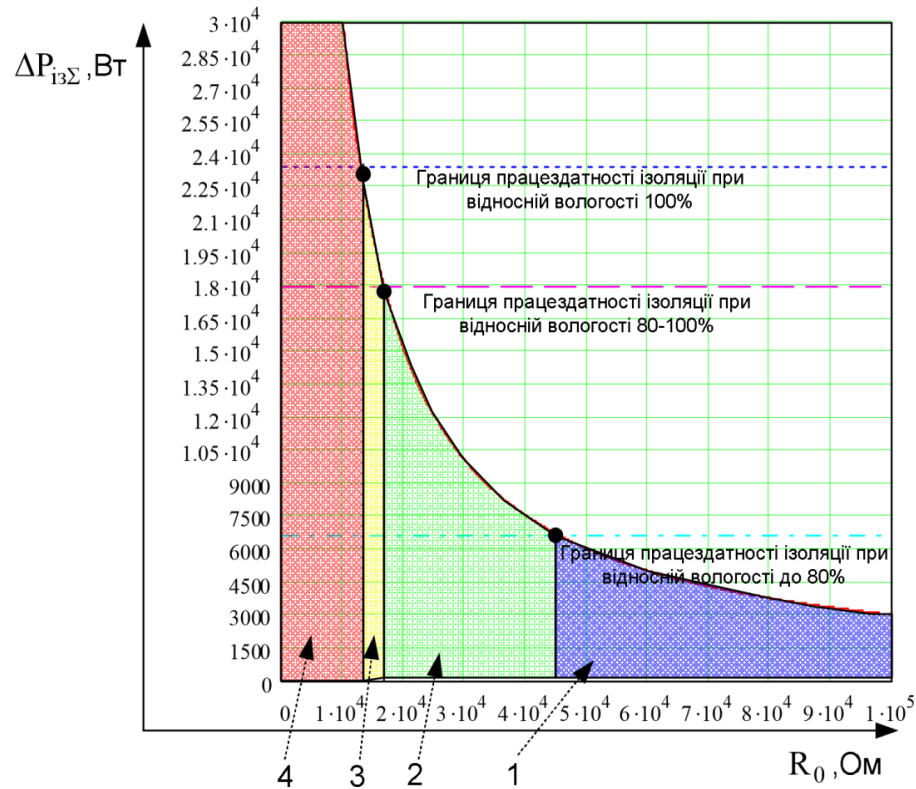
Залежності норм векторів відносних чутливостей від відхилення:  
а – загальний графік залежностей;  
б – функція різниці норми чутливості до  $g_c$  і норми чутливості до  $g_b$

## АНАЛІЗ ПРОСТОРУ ЗМІНИ ЗНАЧЕНЬ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



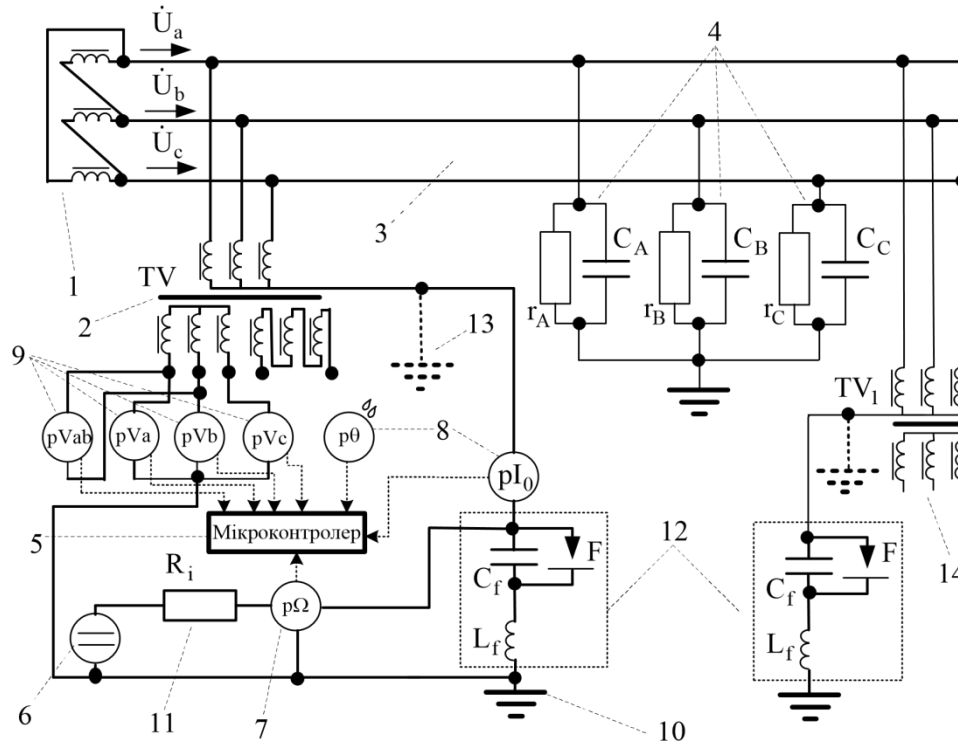
Поверхня залежності потужності втрат в ізоляції із за струмів стікання на землю від обернених величин діагностичних показників для вології погоди

## АНАЛІЗ ПРОСТОРУ ЗМІНИ ЗНАЧЕНЬ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТОЗДАТНОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ



Залежність потужності втрат в ізоляції через струмі стікання на землю від загального опору ізоляції відносно землі  $P_{из} = f(R_0)$

## МЕТОД НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ



Структурна схема пристрою для технічної реалізації методу контролю ізоляції на основі вимірювання загального активного опору ізоляції і напруг фаз мережі відносно землі



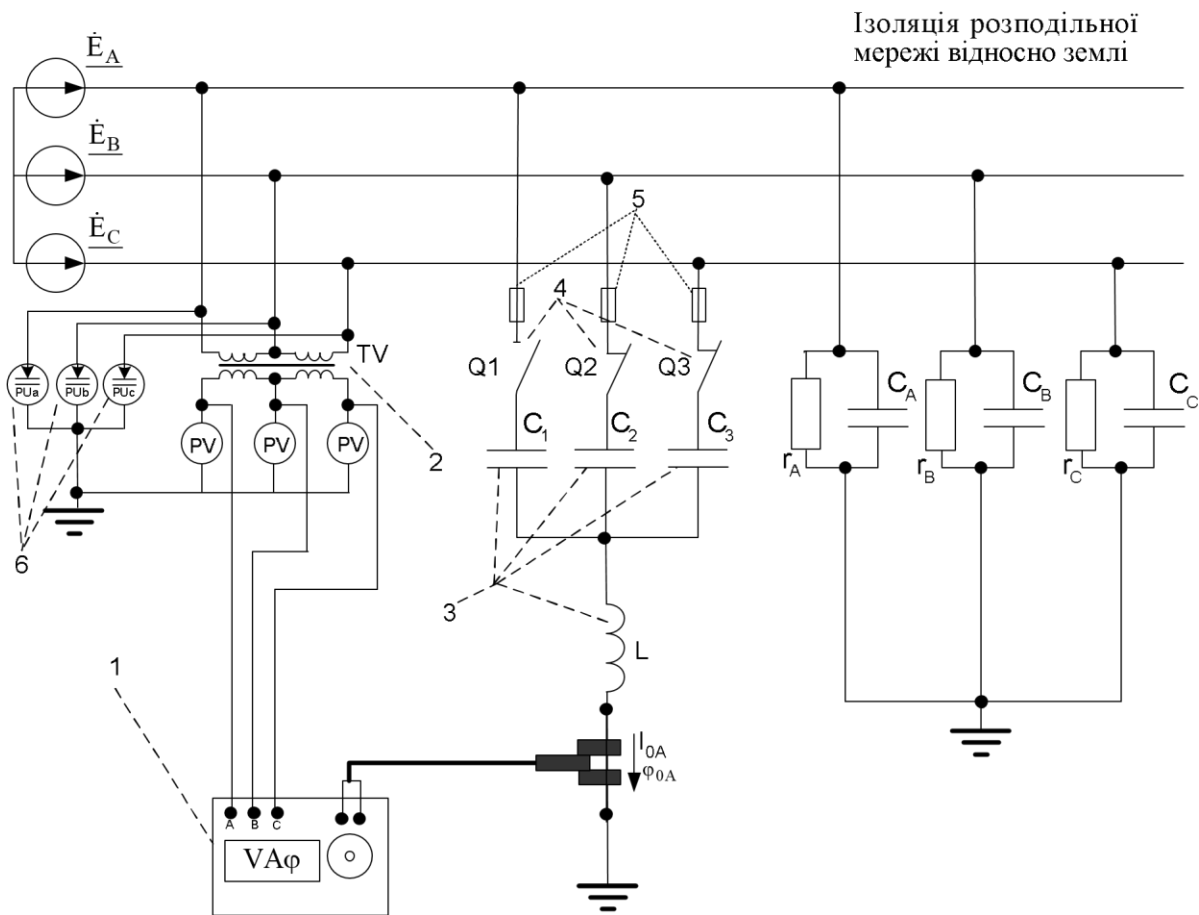
## МЕТОД НЕПЕРЕРВНОГО КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ

Функція розрахункового алгоритму методу:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\
 \times \sqrt{\left[ g_b + g_c + \frac{\omega C_0 (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[ \frac{g_b - g_c}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_A; \\
 \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\
 \sqrt{\left[ g_a + g_c \right]^2 + \left[ \frac{g_c - g_a}{\sqrt{3}} + \frac{2\omega C_0 \cdot K_c - 2B_L}{3} \right]^2} = U_B; \\
 \times \frac{1,5 \cdot U_f}{\sqrt{(1/R_0)^2 + (\omega C - B_L)^2}} \times \\
 \sqrt{\left[ g_a + g_b + \frac{\omega C_0 \cdot (K_c - 1)}{3\sqrt{3}} \right]^2 + \left[ \frac{g_a - g_b}{\sqrt{3}} + \frac{\omega C_0 \cdot (1 + K_c) - 2B_L}{3} \right]^2} = U_c,
 \end{array} \right.$$

де  $K_c = C_{кр} / C_{сер}$  – коефіцієнт несиметрії ємностей крайніх фаз мережі відносно землі;  $C_0$  – загальна ємність мережі відносно землі;  $B_L$  – сумарна реактивна провідність всіх індуктивних елементів

## МЕТОД ПЕРІОДИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ФАЗ РМ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ



Принципова схема пристрою контролю ізоляції окремих фаз відносно землі

## МЕТОД ПЕРІОДИЧНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ФАЗ РМ ВІДНОСНО ЗЕМЛІ

Параметри ізоляції згідно рисунку

$$\left\{ \begin{array}{l} g_a + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_b - C_c) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^{\circ}); \\ g_b + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_c - C_a) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^{\circ}); \\ g_c + \frac{\omega}{\sqrt{3}} \cdot (C_a - C_b) = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0A} + 90^{\circ}); \\ \frac{g_c - g_b}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_a - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0A}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0A} - 30^{\circ}); \\ \frac{g_a - g_c}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_b - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0B}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0B} - 150^{\circ}); \\ \frac{g_b - g_a}{\sqrt{3}} + \omega \cdot C_a - \frac{B_L}{3} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_{0C}}{1.5 U_{\pi}} \cdot \cos(\varphi_{0C} - 30^{\circ}), \end{array} \right.$$

## ВИСНОВКИ

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у тому, що вдосконалено математичну модель визначення умов роботоздатності ізоляції, яка враховує параметри безпеки та струм витікання на землю в умовах експлуатації розподільних мереж, що дозволяє підвищити рівень надійності експлуатації електричних мереж. Отримав подальший розвиток метод неперервного контролю ізоляції, який ґрунтується на вимірюванні мінімальних фазних напруг, що дозволяє збільшити вірогідність контролю РМ.

1. Було проаналізовано загальні принципи виникнення пошкоджень на рівні структурних елементів ізоляції РМ

2. Проаналізовано причини зміни технічного стану ізоляції (грозові перекриття, перикриття ізоляції вітками дерев; вібрація мереж, тощо).

3. На основі моделі виникнення пошкодження ізоляції було отримано математичні моделі визначення роботоздатності ізоляції.

4. Проведено аналіз простору зміни значень діагностичних показників шляхом побудови залежності потужності втрат в ізоляції.

5. Розраховано економічну ефективність використання ДККПІ, для ПС 6—10 кВ.

6. Було розроблено і проаналізовано основні заходи щодо Охорони праці у надзвичайних ситуаціях, при роботі на лініях 6-35 кВ.

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ**  
**ДОПОВІДЬ ЗАКІНЧЕНО**