



РУБАНЕНКО О.С.

УДК: 621.316

РУБАНЕНКО О.С., канд. техн. наук, доц. Вінницький НТУ,
ЖУК І.А., зам. начальника електроцеха Дністровської ГАЕС

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІЗОЛЯЦІЇ МЕРЕЖ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І ПІДСТАНЦІЙ

В даній статті розглядається математичний метод прогнозування ймовірності короткого замикання в мережах оперативного постійного струму на основі аналізу попереднього короточасного зниження ізоляції в цих колах.

Вступ. Складні умови експлуатації електричних мереж обумовлюють виникнення аварій, які часто стають причиною не тільки економічних втрат, але й людських жертв.

Мережі оперативного постійного струму (МОПС) електричних станцій і підстанцій призначені для живлення пристроїв релейного захисту і автоматики, систем керування, приводів високовольтних вимикачів, евакуаційного освітлення. Мережі оперативного постійного струму значно розгалужені, що значно ускладнює пошук місць пошкодження.

Дослідження аварійних ситуацій в МОПС електричних станцій і підстанцій свідчить про те,

що найчастішим видом порушень в цих мережах є замикання одного полюса (\pm) на "землю". Враховуючи термін експлуатації підстанцій та старіння ізоляції МОПС варто прогнозувати зростання таких видів дефектів.

Таким чином, особлива відповідальність мереж ОПС вимагає створення надійних методів і пристроїв прогнозування розвитку коротких замикань на ранніх стадіях.

1. Фактори, які впливають на величину опору ізоляції.

На ізоляцію полюсів у системі ОПС, що знаходяться під робочою напругою, впливають механічні, електричні й атмосферні впливи. Особливо сильно на ізоляцію впливають атмосферні опади: дощ, роса, туман.

З метою з'ясування закономірності зміни опору ізоляції, зібрані статистичні дані про величину цього опору. Для цього на досліджувальній підстанції 330 кВ були встановлені два самописних вольтметри типу КСП-2, із внутрішнім опором не менше 1000 кОм.

Отримані в 2005–2007 роках дані свідчать про те, що на стан ізоляції впливає вологість середовища експлуатації. На Рис. 1 показана залежність опору ізоляції від тривалості дощу. Отримана залежність показує, що при тривалості дощу до 30 хвилин опір ізоляції істотно не змінюється. У наступні 3–4 години опір повільно знижується до 100–80 кОм, після чого відбувається замикання полюса на землю через опір 0–3 кОм, викликане комутаційними перенапругами, поверхневими дуговими розрядами.

Аналіз замикань, що відбулися протягом 2007 року на підстанції 330 кВ, дозволив побудувати гістограму, представлену на Рис. 2.

З цієї гістограми видно, що в середньому, з 10 дощів п'ять призводили до зниження ізоляції полюса менш 100 кОм.

Дослідження показали, що зниження опору до 500 кОм під дією роси відбувається протягом 3–4 годин щодня, коли роса випадає. Незабаром волога випаровується через велику поверхню й ізоляція відновлюється.

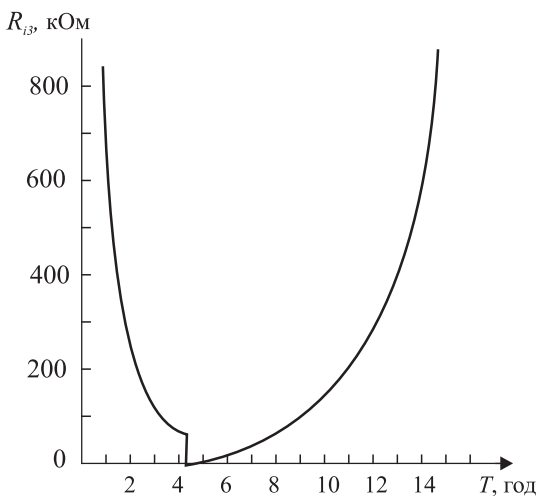


Рис. 1. Залежність опору одного полюса мережі відносно землі від тривалості дощу

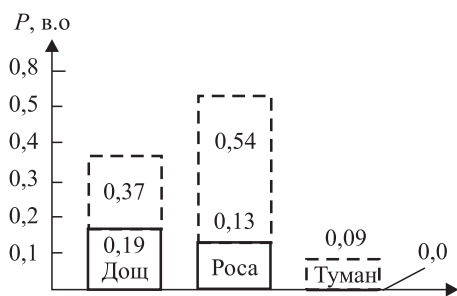


Рис. 2. Гістограма розподілу ймовірностей виникнення замикання на землю через опір від 0 до 30 кОм при різних видах атмосферних опадів:
— — — — ймовірність випадання даного виду опадів,
- - - - ймовірність замикань.



На території досліджуваної підстанції в 2007 році 5 разів був туман. Туман стабільно викликав зниження опору ізоляції до 200–300 кОм. Процес зволоження ізоляції під впливом туману повільний у часі.

Після зникнення туману ізоляція відновлювалася протягом 1–2 годин. Це свідчить про те, що туман проникав у ті місця на території відкритого розподільчого пристрою (ВРП), де розташовані оголені частини кабелів, що знаходяться під робочою напругою. При цьому, у багатьох місцях відбувається незначне погіршення ізоляції, що разом викликає зниження ізоляції полюса до 200 кОм. Якщо під дією дощу або роси кількість однополюсних замикань значно перевищує двохполюсні, то при тумані ізоляція погіршується майже симетрично. При паморозі опір ізоляції полюса не знижувався нижче 500 кОм.

2. Результати експериментальних досліджень величини активного опору в місці замикання.

2.1 Дослідження тривалих змін опору полюсів відносно землі.

З метою обґрунтування уставки спрацьовування пристрою безперервного контролю ізоляції були проаналізовані результати дворічних спостережень за опором ізоляції підстанції 330 кВ у 2000–2007 роках.

З 2005 по 2007 рік усі зниження опору ізоляції до 30 кОм і нижче носили раптовий характер. Від 1 МОм до 200 кОм опір ізоляції знижувалася плавно.

Зниження ізоляції може бути викликано шунтуванням ізоляції в одному місці і появою безлічі шунтувальних зв'язків полюса з “землею” на різних ділянках системи, які являються паралельним з'єднаннями і з високим опором 700–1200 кОм, у кілька разів зменшують опір ізоляції. Очевидно, що в першому випадку зниження ізоляції може швидко перейти у коротке замикання, а в другому випадку ізоляція практично завжди відновлюється, волога випаровується, опір ізоляції збільшується.

Отже, пристрій безперервного контролю опору ізоляції, вирішуючи задачу діагностування стану ізоляції, повинен сигналізувати лише про ті зниження опору ізоляції, що з великим ступенем імовірності можуть привести до коротких замикань.

Розподіл значень величини опору в місці замикання для системи досліджуваної мережі оперативного постійного струму представлено у вигляді гістограми, показаної на Рис. 3.

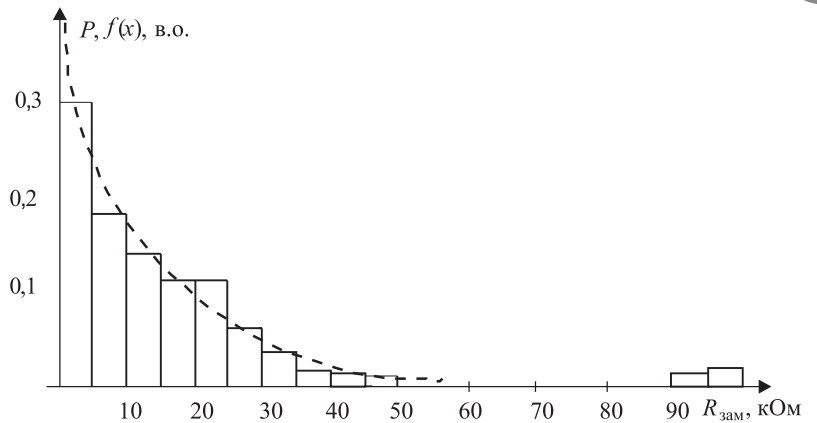


Рис. 3. Гістограма розподілу опору замикання і крива показникового розподілу

З цього випливає, що залежність $P = f(R)$ нагадує криву показникового закону розподілу. Експоненційна регресія (наближення функції по методу найменших квадратів) забезпечує одержання параметрів функції $f(R) = b_0 \exp(b_1 R)$ за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N R_i \sum_{i=1}^N \ln y_i - N \sum_{i=1}^N R_i \ln y_i}{\left(\sum_{i=1}^N R_i\right)^2 - N \sum_{i=1}^N R_i^2}, \quad (1)$$

$$b_1 = \exp \left[\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln y_i - b_0 \sum_{i=1}^N R_i \right) \right], \quad (2)$$

Щільність імовірності показникового закону записується залежністю [1]

$$f(R) = \lambda \exp(-\lambda R), \quad (3)$$

де λ – густина або інтенсивність (середнє число) подій на одиницю опору. У показниковому законі густина є величиною зворотною математичному очікуванню

$$\lambda = 1/[m(R)]. \quad (4)$$

Вирівнюємо показниковим законом отриманий за даними вимірів розподіл активного опору замикання. Як бачимо, аналітична крива досить точно відповідає даним статистичних розрахунків.

Майже через усі місця зі зруйнованої, сильно забрудненої, зволоженої ізоляції відбувається замикання полюса на землю при зниженні опору ізоляції до 100 кОм. Від 40 кОм і нижче зростає кількість повторних замикань. Їхня імовірність досягає 0,36. Застосування пристроїв контролю ізоляції викликано можливістю повторних замикань. Це дозволить проаналізувати причини таких спрацьовувань і, в разі необхідності, вжити заходи з метою уникнення повторних спрацьовувань. Тоді (пунктирна лінія на Рис. 3) імовірність замикань у діапазоні 0–100 кОм повинна змен-



Таблиця 1. Результати статистичних досліджень

$R1_{пол}$	кількість	T	кількість	k	кількість	$R2_{пол}$	кількість
30	2	1	1	2	1	30	5
40	6	1	1	2	1	40	18
80	15	1	2	2	2	80	52
100	22	1	2	2	1	100	83
200	2	1	0	2	0	200	216
300	1	1	0	2	0	300	348
30	2	2	1	4	1	30	5
40	6	2	3	4	3	40	18
80	15	2	4	4	4	80	52
100	22	2	3	4	1	100	83
200	2	2	0	4	0	200	216
300	1	2	0	4	0	300	348
30	2	4	0	5	0	30	5
40	6	4	2	5	2	40	18
80	15	4	6	5	6	80	52
100	22	4	3	5	13	100	83
200	2	4	1	5	1	200	216
300	1	4	0	5	0	300	348
30	2	8	0	7	0	30	5
40	6	8	3	7	3	40	18
80	15	8	4	7	4	80	52
100	22	8	1	7	1	100	83
200	2	8	0	7	0	200	216
300	1	8	0	7	0	300	348
30	2	24	0	8	0	30	5
40	6	24	0	8	0	40	18
80	15	24	8	8	3	80	52
100	22	24	0	8	0	100	83
200	2	24	0	8	0	200	216

питься від 0,36 до 0,07, а в діапазоні 0–30 кОм – від 0,3 до 0.

2.2. Дослідження короточасних змін опору полюсів відносно “землі”.

З метою завчасного прогнозування зменшень опору ізоляції до уставки спрацьовування пристрою контролю ізоляції (тобто до 20 кОм) потрібно дослідити статистику попередніх змін опору. Тому були проаналізовані зміни опору полюсів, які тривали до 1 хвилини, і шляхом обробки статистичних даних були визначені:

- кількості короточасних зменшень опору полюсів протягом року в залежності від величини зменшення опору $R1_{пол}$, які в майбутньому привели до тривалого зменшення опору до 20 кОм і менше;
- кількості короточасних зменшень опору полюсів, які в майбутньому привели до тривалого зменшення опору до 20 кОм і менше, в залежності від проміжку часу T , за який була поражена ця кількість імпульсів, та в залежності від величини зменшення опору $R1_{пол}$;
- кількості короточасних зменшень опору полюсів, які в майбутньому привели до тривалого

Таблиця 2. Результати статистичних досліджень

$R1_{пол}$	$P_1(R1_{пол})$	T	$P_2(T)$	k	$P_3(k)$	$R2_{пол}$	$P_4(R2_{пол})$
30	0,042	1	0,5	2	0,5	30	0,4
40	0,125	1	0,166667	2	0,166667	40	0,33
80	0,313	1	0,133333	2	0,133333	80	0,288
100	0,46	1	0,090909	2	0,045455	100	0,265
200	0,042	1	0	2	0	200	0,01
300	0,02	1	0	2	0	300	0,0028
30	0,042	2	0,5	4	0,5	30	0,4
40	0,125	2	0,5	4	0,5	40	0,33
80	0,313	2	0,266667	4	0,266667	80	0,288
100	0,46	2	0,136364	4	0,045455	100	0,265
200	0,042	2	0	4	0	200	0,01
300	0,02	2	0	4	0	300	0,0028
30	0,042	4	0	5	0	30	0,4
40	0,125	4	0,333333	5	0,333333	40	0,33
80	0,313	4	0,4	5	0,4	80	0,288
100	0,46	4	0,227273	5	0,590909	100	0,265
200	0,042	4	0,5	5	0,5	200	0,01
300	0,02	4	1	5	1	300	0,0028
30	0,042	8	0	7	0	30	0,4
40	0,125	8	0	7	0	40	0,33
80	0,313	8	0,2	7	0,2	80	0,288
100	0,46	8	0,181818	7	0,181818	100	0,265
200	0,042	8	0,5	7	0,5	200	0,01
300	0,02	8	0	7	0	300	0,0028
30	0,042	24	0	8	0	30	0,4
40	0,125	24	0	8	0	40	0,33
80	0,313	24	0	8	0	80	0,288
100	0,46	24	0,363636	8	0,136364	100	0,265
200	0,042	24	0	8	0	200	0,01
300	0,02	24	0	8	0	300	0,0028

зменшення опору до 20 кОм і менше, в залежності від кількості k короточасних зменшень опору полюсів за визначений проміжок часу спостережень, за який була поражена ця кількість імпульсів, та в залежності від величини зменшення опору $R1_{пол}$.

Результати статистичних досліджень наведені в Табл. 1.

З метою визначення найбільш інформативних (з точки зору достовірності прогнозування тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше) величин контрольованих параметрів, поражуємо імовірність виникнення тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше для різних величин сукупностей контрольованих параметрів. Результати розрахунків наведені в Табл. 2 та показані:

- ймовірності (P_1) тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше в залежності від величини зменшення опору $R1_{пол}$. Вона визначалась, як відношення кількості зменшень опору полюса (при певній величині цього опору), які в подальшому призвели до тривалого зменшення опору полюсів



до 20 кОм і менше, до загальної кількості тривалих зменшень опору полюсів до 20 кОм і менше;

- ймовірності (P_2) тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше в залежності від величини часу спостережень. Вони визначались, як відношення кількості зменшень опору полюса (за певний час спостережень), які в подальшому привели до тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше, до загальної кількості тривалих зменшень опору полюсів до 20 кОм і менше;

- ймовірності (P_3) тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше в залежності від кількості (k) короточасних зменшень опору за певний час. Вони визначались, як відношення кількості зменшень опору полюса (при певній кількості зменшень опору полюсів за певний час до певного опору), які в подальшому привели до тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше, до загальної кількості тривалих зменшень опору полюсів до 20 кОм і менше;

- ймовірності (P_4) тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше в залежності від величини зменшення опору $R2_{пол.}$. Вони визначались, як відношення кількості зменшень опору полюса (при певній величині цього опору), які в подальшому привели до тривалого зменшення опору полюсів до 20 кОм і менше, до загальної кількості короточасних зменшень опору полюса цієї ж величини опору (тобто до сумарної кількості таких зменшень опору, які приводили в майбутньому до зменшень 20 кОм і менше, разом з кількістю зменшень опору, які не приводили в майбутньому до зменшень 20 кОм і менше).

3. Визначення аналітичних залежностей ймовірностей зменшень опорів від контрольованих параметрів.

Під час обробки результатів експериментальних досліджень часто описують отримані (експериментальним шляхом, шляхом спостережень) табличні результати, рівнянням. В більшості випадків таке рівняння згладжує експериментальні дані, тобто апроксимує їх. Тому для побудови досліджуваних закономірностей використаємо математичні методи апроксимації табличних даних, отриманих експериментальним шляхом. Основне завдання апроксимації – побудова наближеної (що апроксимує) функції, яка найбільш близько проходить навколо заданих точок або біля заданої неперервної функції

Аналізуючи дані Табл. 2 бачимо, що ймовірність вірного прогнозування зменшення опору полюса до 20 кОм в залежності від величини попереднього короточасного зменшення цього

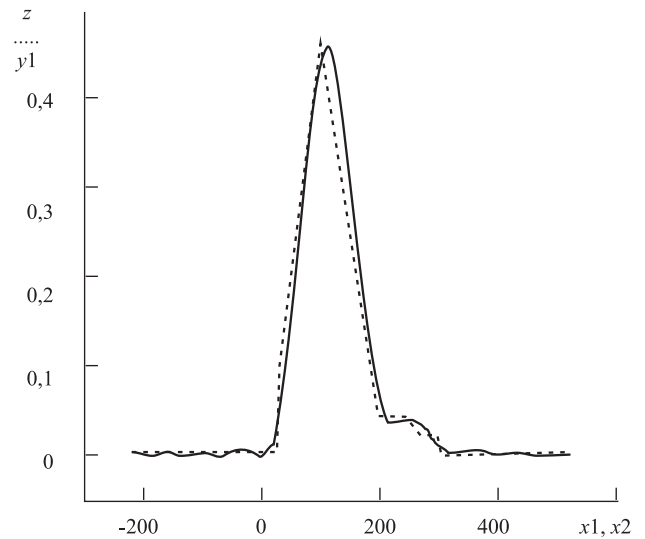


Рис. 4. Залежність ймовірності вірного прогнозування зменшення опору полюса до 20 кОм в залежності від величини попереднього короточасного зменшення цього опору

опору нагадує криву нормального закону розподілу. В результаті апроксимації (Рис.4) отримано рівняння (5)

$$P_1 = -4.378e-3 + 8.233e-5 \cdot R1 + 2.649e-5 \cdot R1^2 + 7.003e-7 \cdot R1^3 + 2.143e-9 \cdot R1^4 - 8.607e-11 \cdot R1^5 - 4.431e-13 \cdot R1^6 + 5.522e-15 \cdot R1^7. \quad (5)$$

Аналіз даних Табл. 2, виразу (5) та Рис. 4 дозволяють зробити висновок: якщо мали місце попередні короточасні зменшення опору полюса близько до 100 кОм, то ймовірність виникнення в найближчому майбутньому тривалого зменшення опору полюса до 20 кОм є найбільшою і становить 46 %.

Маючи ймовірності прогнозування зменшення опору ізоляції полюсів відносно землі в залежності від зміни по кожному з контрольованих параметрів, визначаємо загальну вірогідність безпомилкового прогнозування P в залежності від одночасного впливу всіх параметрів (6)

$$P_{\Sigma}(R1_{пол.}, T, k, R2_{пол.}) = P1(R1_{пол.})P2(T)P3(k)P4(R2_{пол.}). \quad (6)$$

З метою визначення аналітичної залежності $P_{\Sigma} = f(R1_{пол.}, T, k, R2_{пол.})$ апроксимуємо отримані дані кривою, яка відповідає поліноміальному рівнянню другого ступеня (7)

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n N_i \prod_{j=1}^m X_j^{I_{ji}}, \quad (7)$$

де N_i – коефіцієнти перед додатками, n – кількість додатків, $X_1 = R1_{пол.}$, $X_2 = T$, $X_3 = k$, $X_4 = R2_{пол.}$, m – кількість аргументів ($m = 4$), B – показник ступеня кожного аргументу в кожному додатку.

Для визначення кількості n , величин N та B



скористуємось програмою, яка працює в середовищі MathCad:

$$P_{\Sigma} = (-0.0000000371 \cdot R1_{\text{пол}} \cdot R2_{\text{пол}}) + 0.0000004926 \cdot T \cdot R2_{\text{пол}} + (-0.000000574 \cdot k \cdot R2_{\text{пол}}) + (-0.0000000371 \cdot R2_{\text{пол}}^2) + 0.0000102602 \cdot R2_{\text{пол}} + (-0.000000574 \cdot R1_{\text{пол}} \cdot k) - 0.0009760619 \cdot T \cdot k + (-0.0004285026 \cdot k^2) + 0.0058791808 \cdot k + 0.0000004926 \cdot R1_{\text{пол}} \cdot T + (-0.0000203018 \cdot T^2) + 0.0028419419 \cdot T + (-0.0051634684 \cdot R1_{\text{пол}}) + 0.0000102602 \cdot R1_{\text{пол}} + (-0.0000000371 \cdot R1_{\text{пол}}^2). \quad (8)$$

4. Знаходження оптимальних параметрів контролю.

Знайдемо, за яких величин параметрів $R1_{\text{пол}}$, T , k , $R2_{\text{пол}}$, параметр P_{Σ} матиме максимальне значення. Скористуємось традиційним методом пошуку екстремуму багатопараметричної функції [1].

Для цього складемо систему рівнянь (9), яка утворена з перших похідних від рівняння (8) по $R1_{\text{пол}}$, T , k , $R2_{\text{пол}}$.

$$\begin{cases} -7.42e-8 \cdot R1_{\text{пол}} + 4.926e-7 \cdot T - 5.74e-7 \cdot k - 3.71e-8 \cdot R2_{\text{пол}} + 0.000102602 = 0 \\ 4.926e-7 \cdot R1_{\text{пол}} - 0.0000406 \cdot T + 0.0009761 \cdot k + 4.926e-7 \cdot R2_{\text{пол}} + 0.002842 = 0 \\ -5.74e-7 \cdot R1_{\text{пол}} + 0.0009761 \cdot T - 0.000857 \cdot k - 5.74e-7 \cdot R2_{\text{пол}} + 0.0058791 = 0 \\ -3.71e-8 \cdot R1_{\text{пол}} + 4.926e-7 \cdot T - 5.74e-7 \cdot k - 7.42e-8 \cdot R2_{\text{пол}} + 0.00001026 = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

За допомогою MathCad знаходимо рішення:

Для нашої задачі цільова функція, з урахуванням чутливості додатків апроксимованого рівняння, записується так:

$$P_{\Sigma} = -0.00098606186 \cdot T \cdot k + 0.00587918076 \cdot k + 0.00284194189 \cdot T. \quad (10)$$

Перше обмеження записується:

$$R1 \cdot k - 2400 \leq 0, \quad (11)$$

Друге обмеження записується:

$$R1 \cdot R2 - 900 \leq 0, \quad (12)$$

Рівняння Лагранжа

$$L_{P_{\Sigma}} = -0.00098606186 \cdot T \cdot k + 0.00587918076 \cdot k + 0.00284194189 \cdot T + \mu_1 (R1 \cdot k - 2400) + \mu_2 (R1 \cdot R2 - 900). \quad (13)$$

де μ_1 та μ_2 – неозначені множники Лагранжа (відповідно для кожного з обмежень).

Визначимо максимальне значення цільової функції P_{Σ} (8) за порохованих оптимальних значень аргументів:

$$R1_{\text{пол опт}} = R2_{\text{пол опт}} = 100 \text{ кОм}, T_{\text{опт}} = 6 \text{ год.}, k_{\text{опт}} = 3 \text{ рази.}$$

Як бачимо $P_{\Sigma \text{ опт}} = 0,019$. Використання методу критеріального програмування дозволило знайти максимальне значення цільової функції і оптимальні значення аргументів цієї функції, які забезпечують досягнення цільовою функцією її максимуму. Ці значення аргументів є оптимальними значеннями контрольованих параметрів, які забезпечують максимальну ймовірність прогнозування.

Висновки

1. Тривалим зменшенням опору ізоляції полюса мережі оперативного постійного струму часто передують короточасні зменшення цього опору.

2. Короточасні зменшення опору полюса відносно “землі” до 100 кОм і менше можуть бути ознакою стійкого зменшення цього опору до 20 кОм і менше в майбутньому.

3. Якщо кількість короточасних (менше 1 хвилини) зменшень опору полюса відносно землі до 100 кОм і менше буде не менше 3 разів на протязі не більше 6 годин, то ймовірність прогнозування стійкого зменшення цього опору до 20 кОм і менше в майбутньому (на ранній стадії розвитку дефекту) буде найбільшою.

4. Використання методу критеріального програмування дозволило знайти оптимальні значення контрольованих параметрів, які забезпечують максимальну ймовірність прогнозування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера./ – К.: Техника, 1975. – 768 с.
2. Методические указания по расчету защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций. МУ 34-70-035-83. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1979. – 66 с.
3. Рубаненко А.Е., Кобылянский А.В. Совершенствование защиты от замыканий на землю сетей постоянного тока./ Промышленная энергетика. – 1988. – № 2. – С. 35-38.

