

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОВЕРХНЕВОГО СТРУМУ ВИТОКУ ОПОРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ КОМПЛЕКТНИХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ

Плешков П.Г., к.т.н., доц.

Серебренніков С.В., к.т.н., доц.

Сіріков О.І., ас.

Кіровоградський національний технічний університет

Повна поштова адреса: просп. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006

E-mail: ets@kntu.kr.ua

Проведен сравнительный анализ математических моделей поверхностного тока утечки опорных изоляторов комплектных распределительных устройств, полученных без учета и при учете неравномерности распределения погонных параметров вдоль поверхности изолятора. Разработано устройство измерения комплексного поверхностного тока утечки и параметров окружающей среды.

Ключевые слова: ток утечки, изолятор, измерение, загрязнение.

The comparative analysis of mathematical models of a surface current of outflow of support insulator of the complete switching centres received without taking into account and at the account of non-uniformity of distribution of running parameters along a surface of isolator. The arrangement of measurement of environmental factors and a complex surface current of outflow is developed.

Key words: a current leakage, isolator, measurement, pollution.

Вступ. Основною причиною аварійних відключень розподільчих електромереж є перекриття і пошкодження ізоляції – приблизно 30 % від загальної кількості. Втім у комплектних розподільчих пристроях зовнішньої установки (КРПЗ) ця причина призводить до 80 % аварійних відключень [1]. Перекриття ізоляції виникають внаслідок зниження ізоляційної міцності при забрудненні поверхні ізоляційних конструкцій. Наприклад, розрядна напруженість вздовж чистої поверхні ізолятора становить 3–5 кВ/см, а забрудненої – 0,5–1 кВ/см [2], тобто відбувається її різке зниження у 3–10 разів. Бруд, який накопичується на поверхні ізоляторів повітряних ліній періодично змивається атмосферними опадами. Натомість, враховуючи, що ізолятори КРПЗ розташовані в шафі, єдиним дієвим і найбільш поширеним на сьогодні засобом боротьби з перекриттям ізоляторів є їх профілактична очистка. Згідно з «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» інтервали між очищеннями визначаються з урахуванням місцевих умов особою, відповідальною за електрогосподарство. Наприклад, для Кіровоградобленерго встановлено планову очистку ізоляторів проводити двічі на рік.

Враховуючи, що на процес забруднення ізоляції впливає велика кількість випадкових факторів таких, як атмосферні умови, швидкість та напрям вітру, кількість забруднюючої речовини в повітрі, розташування підстанції, якість ущільнення шаф тощо, їх планове очищення може бути передчасним, а інколи, за несприятливих умов – запізнє. Підвищити ефективність планових очищень дозволив би поточний автоматичний контроль рівня забруднення поверхні ізоляторів безпосередньо під робочою напругою.

Аналіз літературних джерел. Найбільш раціональним та інформативним є метод неруйнівного контролю забруднення ізоляції, оснований на вимірюванні струму витоку [3]. Перевагою методу є те, що він дозволяє визначати поточний рівень забрудненості поверхні на будь-якій стадії. Водночас він потребує удосконалення, оскільки має залежність інформативного параметру – поверхневого струму витоку від вологості оточуючого ізолятор повітря, прикладеної напруги, температури, характеру забруднення [4].

При нерівномірному забрудненні поверхні ізолятора, зокрема – при секторному характері забруднення, одному і тому ж значенню струму витоку можуть відповідати різні розрядні напруги [5]. Нерівномірність забруднення обумовлена тим, що ізолятори в комірках КРПЗ розташовують горизонтально, вертикально або під кутом. На вертикально розташованих ізоляторах забруднення з усіх боків практично однакове. Натомість, при горизонтальному розміщенні спостерігається переважне осідання забруднюючих частинок на верхньому секторі ізолятора вздовж якої може розвинутихся перекриваюча ізолятор дуга навіть при незначному струмі витоку. З часом величина сектора забруднення збільшується аж поки не буде забруднена вся поверхня ізолятора. Тому неможливо однозначно інтерпретувати результати контролю при невідомому куті сектора забруднення. Це унеможливило коригування критеріїв діагностики шляхом простого вибору нових граничних рівнів критичного значення струму витоку.

Суттєво підвищити точність діагностики реального стану ізоляторів можна введенням датчика вологості та контролюванням реактивної складової в поверхневому струмі витоку, яка буде залежати від площі сектора забруднення [6]. Для оцінки залежно-

сті реактивної складової в поверхневому струмі витоку від величини сектора і ступеня забруднення була розроблена математична модель [7], в якій припускалося, що погонна ємність забрудненої поверхні ізолятора до струмопровідної шини та заземленої площини, на якій розташований ізолятор, рівномірно розподілена вздовж осі ізолятора. Таке припущення дозволило аналітично отримати шукану залежність зміни струму та напруги вздовж осі ізолятора. Втім, як показали експериментальні дослідження по визначенню реального розподілу погонних параметрів, припущення щодо рівномірності розподілу погонної ємності дає лише якісну картину [8]. Для отримання кількісних результатів математичну модель було вдосконалено шляхом врахування нерівномірності розподілу погонних поверхневого опору та ємності [9].

Мета роботи. Метою статті є порівняльний аналіз результатів математичного моделювання поверхневого струму витоку в кінці ізолятора отриманого за різними математичними моделями.

Матеріал і результати дослідження. За допомогою розроблених математичних моделей обчислено залежність комплексного струму витоку в кінці ізолятора від поверхневого опору. Для цього визначено межі зміни питомого погонного опору r_0 ; яке можна розрахувати за формулою:

$$r_0 = \frac{U}{H \cdot I}, \quad (1)$$

де U – прикладена до ізолятора напруга;
 H – висота ізолятора (для ИОР-10-750-I $H=120$ мм);
 I – значення поверхневого струму витоку.

Для знаходження мінімального r_0 необхідно в (1) підставити максимально можливий струм витоку $I_{кр}$. Для опорних ізоляторів КРПЗ 10 кВ при рівномірному забрудненні і зволоженні всієї поверхні ізолятора $I_{кр}=0,4$ мА [4]. Тоді мінімальне значення питомого погонного опору:

$$r_{0min} = \frac{U_{л}/\sqrt{3}}{H \cdot I_{кр}} = \frac{10000/\sqrt{3}}{120 \cdot 0,0004} = 125 \text{ кОм/мм.}$$

Максимальне значення r_0 не обмежується, тому приймаючи реальне значення $I_{min}=10$ мкА, отримаємо:

$$r_{0max} = \frac{U_{л}/\sqrt{3}}{H \cdot I_{min}} = \frac{10000/\sqrt{3}}{120 \cdot 0,00001} = 5 \text{ МОм/мм.}$$

При нерівномірному забрудненні ізолятора струм витоку протікає лише через відповідний забруднений сектор, а не всю його поверхню. Тому при моделюванні секторного забруднення значення питомого поверхневого опору відповідно збільшувалося: при секторі 1/2 поверхні – у два рази, при 1/4 – в чотири рази.

Значення погонної ємності для опорних ізоляторів розраховуються за емпіричною залежністю, отриманою у [8].

Для двох типів опорних ізоляторів ИОР-10-750-I та ИОР-10-750-III при використанні математичної моделі з рівномірно розподіленими параметрами було розраховано активну та реактивну складові струму витоку та кут зсуву фази між прикладеною

до ізолятора напругою і струмом витоку в кінці ізолятора в залежності від поверхневого погонного опору та побудовано відповідні графіки на рис. 1–3.

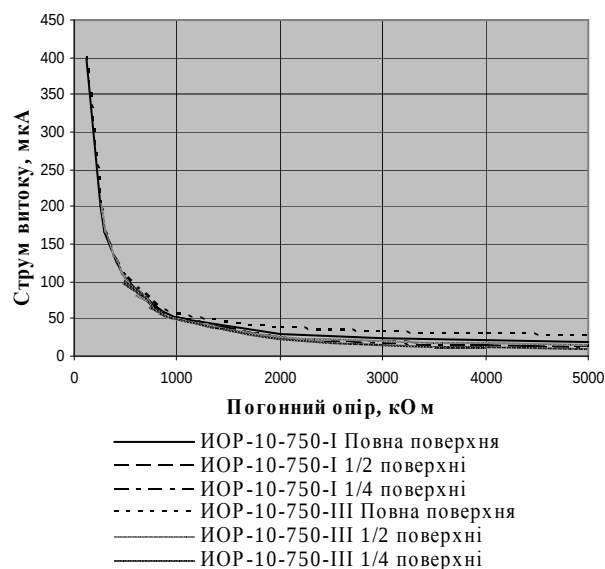


Рисунок 1 - Графіки залежності активної складової поверхневого струму витоку в кінці ізолятора від погонного опору (обчислено згідно математичній моделі з рівномірно розподіленими параметрами)

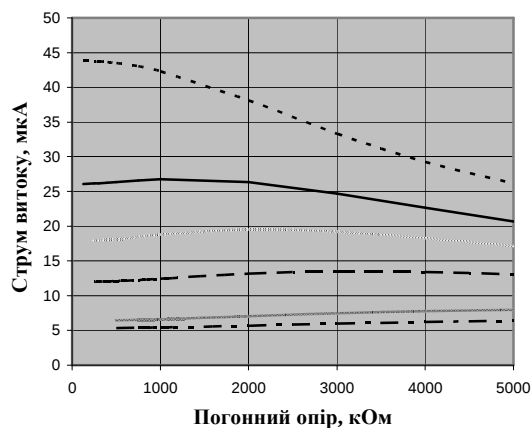


Рисунок 2 - Графіки залежності реактивної складової поверхневого струму витоку в кінці ізолятора від погонного опору (обчислено згідно математичній моделі з рівномірно розподіленими параметрами)

Використання математичної моделі з врахуванням нерівномірності розподілення параметрів вздовж осі ізолятора більш адекватно описує реальні процеси створення поверхневого струму витоку. Графіки активної, реактивної складової струму витоку та кута зсуву фази між прикладеною до ізолятора напругою і струмом витоку в залежності від поверхневого погонного опору наведені на рис. 4 – 6.

З аналізу графіків видно, що реактивна складова суттєво залежить від величини сектора забруднення, а отже вимірювання параметрів комплексного поверхневого струму витоку дозволить визначити величину сектора забруднення для врахування її при обчисленні критичного струму витоку.

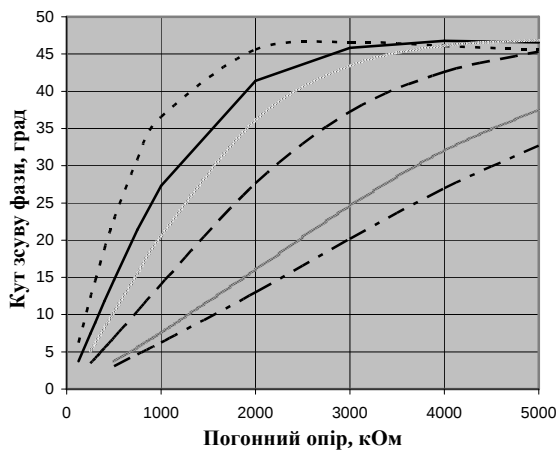


Рисунок 3 – Графіки залежності кута зсуву фази між прикладеною до ізолятора напругою і поверхневим струмом витoku в кінці ізолятора в залежності від погонного опору (обчислено згідно математичній моделі з рівномірно розподіленими параметрами)

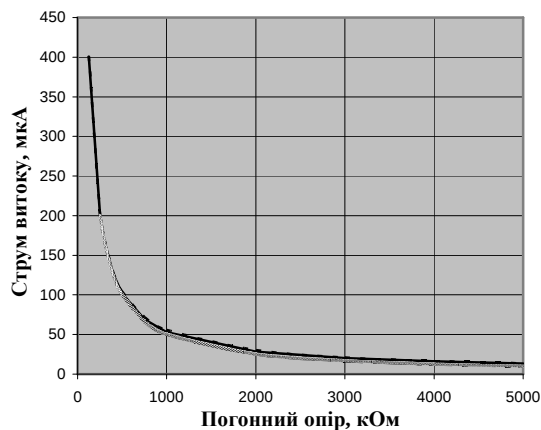


Рисунок 4 – Графіки залежності активної складової поверхневого струму витoku в кінці ізолятора від погонного опору (обчислено по математичній моделі з урахуванням нерівномірного розподілення параметрів).

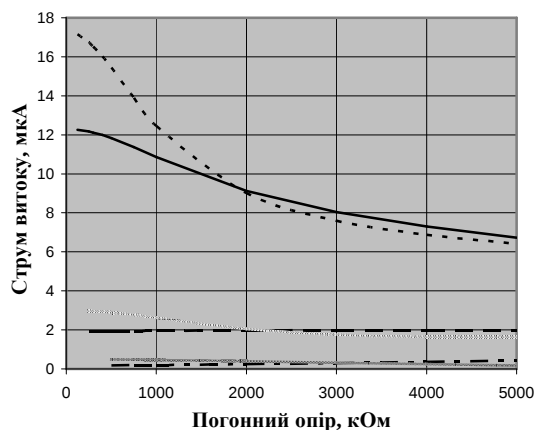


Рисунок 5 – Графіки залежності реактивної складової поверхневого струму витoku в кінці ізолятора від погонного опору (обчислено по математичній моделі з урахуванням нерівномірного розподілення параметрів).

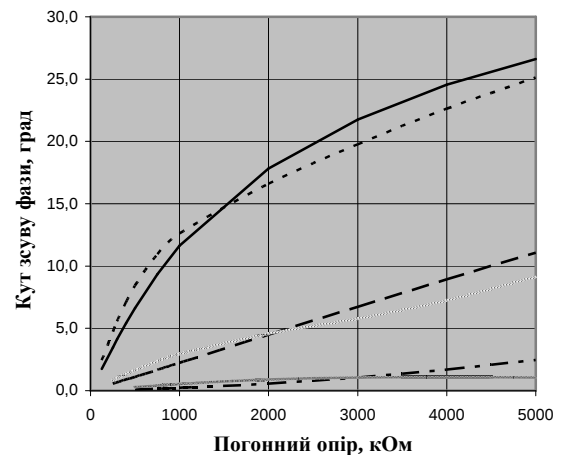


Рисунок 6 – Графіки залежності кута зсуву фази між прикладеною до ізолятора напругою і поверхневим струмом витoku в кінці ізолятора в залежності від погонного опору (обчислено по математичній моделі з урахуванням нерівномірного розподілення параметрів).

Для технічної реалізації запропонованої системи контролю ступеня забруднення під напругою [6] був розроблений пристрій, який дозволяє вимірювати наступні параметри: амплітудні значення перших гармонік прикладеної до ізолятора напруги та струму; вологість оточуючого ізолятор повітря; температуру ізолятора та оточуючого його повітря [10].

Контроль реактивної складової здійснюється за результатами вимірювань кута зсуву фаз φ між напругою і струмом, які можуть мати нелінійні спотворення. Для вимірювань фази $\varphi \geq 0,1^\circ$ використаний ортогональний спосіб з дискретною обробкою сигналів, який дозволяє визначати зсув фаз між основними гармоніками.

Функціональна схема пристрою наведена на рис 7.

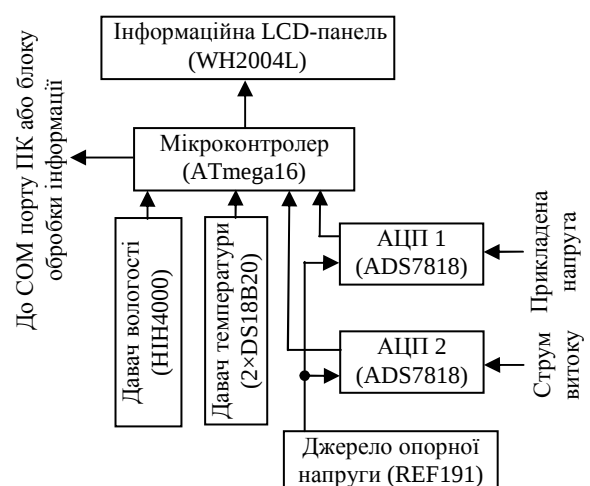


Рисунок 7 – Функціональна схема пристрою вимірювання комплексного поверхневого струму та параметрів оточуючого ізолятор середовища

Основний елемент вимірювального пристрою – мікроконтролер (МК) ATmega16. Вимірювання тем-

ператур здійснюється цифровими давачами DS18B20 з дискретністю $0,1^{\circ}\text{C}$. Абсолютна похибка вимірювання температури давачем складає $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Шляхом додаткового калібрування її зменшено до $0,1^{\circ}\text{C}$. Давачі температури підключені паралельно до МК з допомогою інтерфейсу 1-Write. Вимірювання вологості здійснюється аналоговим резистивним давачем вологості НІН-4000-003 з точністю $\pm 0,5\%$.

Перетворення аналогового сигналу дослідної напруги в цифрову здійснюється мікросхемою АЦП 1, а струму – АЦП 2. В якості АЦП використані мікросхеми ADS7818 які мають розрядність 12 біт. Передача інформації від АЦП до МК здійснюється послідовним інтерфейсом який реалізований в МК програмно. Це дозволяє проводити синхронну вибірку з обох каналів – напруги і струму. В якості прецизійного джерела опорної напруги для АЦП використана мікросхема REF191 яка видає $2,048\text{ В}$ з точністю $\pm 2\text{ мВ}$. Вимірювання мікросхемами АЦП відбувається 64 рази за один період та ініціалізується перериваннями від таймера/лічильника TC1.

Висновки. Порівняльний аналіз моделей поверхневого струму витоку з урахуванням нерівномірності розподілення параметрів і без нього показав:

- 1) в обох математичних моделях активна складова поверхневого струму витоку в кінці ізолятора при збільшенні погонного опору спадає за гіперболічною залежністю; водночас, секторність забруднення слабо впливає на активну складову струму, особливо у зоні $125\text{--}1000\text{ кОм}$ (рис.1 і 4);
- 2) сектор забруднення значно впливає на реактивну складову в поверхневому струмі витоку (рис. 2 і 5), а саме – чим більший сектор забруднення, тим більша реактивна складова; урахування нерівномірності розподілення параметрів у кілька разів знижує значення реактивної складової струму та нівелює вплив геометрії (марки) ізолятора;
- 3) висновок 2 є справедливим і для кута зсуву фаз між прикладеною до ізолятора напругою та поверхневим струмом; спостерігається зменшення нелінійності залежностей при урахуванні нерівномірності розподілення параметрів (рис. 6);
- 4) чутливість та похибка вимірювання кута зсуву фаз повинні бути, як мінімум, сумірними з найменшим кутом, який був отриманий в результаті математичного моделювання – $0,1^{\circ}$;
- 5) результати доводять, що кут зсуву фаз між прикладеною напругою та поверхневим струмом може слугувати додатковим параметром контролю, причому найбільша чутливість такого контролю реалізується на початкових етапах забруднення при $r_0=5000\text{--}1000\text{ кОм}$ (рис. 6), але за менших $r_0<1000\text{ кОм}$ кращу чутливість має контроль за реактивною складовою струму витоку (рис. 5).
- 6) розроблений пристрій дозволяє вимірювати параметри комплексного поверхневого струму витоку (амплітудні значення перших гармоні напруги і струму, кут зсуву фази між ними) та оточуючого середовища (температуру і вологість повітря, температуру ізолятора) для компенсації їх впливу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Орлович А.Е. Способы повышения надежности КРУН напряжением 6, 10 кВ // Повышение экономичности и надежности электрификации сельского хозяйства: Сб. науч. тр. / Моск. ин-т с.-х. пр-ва. – М., 1986. – С. 24-26.
2. Бажанов С.А., Воскресенский В.Ф. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1977.
3. Серебренников С.В., Сіріков О.І. Вибір інформативних параметрів для контролю забрудненості високовольних ізоляторів // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 11: Електромагнітний, ультразвуковий та оптичний неруйнівний контроль матеріалів: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2006. С. 224-229.
4. Серебренников С.В., Сіріков О.І. Підвищення точності діагностики ізоляторів при ортогональному вимірюванні фази струму витоку // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 13: Теорія і практика неруйнівного контролю матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2008. С. 238-243.
5. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.
6. Патент України №25587 МПК H02N 7/26 Спосіб контролю ступеня забрудненості поверхні ізоляторів під напругою / Сіріков О.І. – надр. 10.08.2007. Бюл. №12.
7. Сіріков О.І. Діагностика стану забруднення високовольних ізоляторів під напругою по струму витоку // Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, вип. 12: Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Зб. наук. праць. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2007. С. 273-279.
8. Серебренников С.В., Сіріков О.І. Электрический контроль забруднення високовольних ізоляторів під напругою. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Вип. 19. – Кіровоград: КНТУ, 2007. С. 275-280.
9. Серебренников С.В., Сіріков О.І. Моделювання комплексного поверхневого струму витоку високовольних ізоляторів з урахуванням нерівномірності забруднення поверхні. Вісник національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008. №40. С. 111-114.
10. Серебренников С.В., Сіріков О.І. Пристрій неруйнівного контролю стану високовольних ізоляторів // Матеріали 14-ої міжнародної науково-технічної конференції ”Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів”, 16-21 лютого 2009 р., Славське Львівської області. С. 85-86.