

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДІАГНОСТИКИ ІЗОЛЯТОРІВ ПРИ ОРТОГОНАЛЬНОМУ ВИМІРЮВАННІ ФАЗИ СТРУМУ ВИТОКУ

Одним із шляхів підвищення надійності та економічності систем електропостачання є перехід на технічне обслуговування не за часом напрацювання, а за фактичним станом електричного обладнання. Це передбачає всебічний і ґрунтовний контроль діагностичних параметрів електричного обладнання, а особливо його ізоляції, яка з часом неминуче забруднюється продуктами вивітрювання з поверхні землі та промисловими виносками [1].

Як показують статистичні дослідження в найбільш вразливому становищі знаходиться ізоляція комплектних розподільчих пристроїв зовнішньої установки (КРПЗ) перекриття якої від забруднення і зволоження призводить до 70% аварійних відключень [2]. Натомість бруд, який накопичується на поверхні ізоляторів повітряних ліній періодично змивається атмосферними опадами. Тому єдиним ефективним і самим розповсюдженим на сьогодні засобом боротьби з перекриттям ізоляторів КРПЗ 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 контроль рівня забруднення поверхні ізоляторів безпосередньо під робочою напругою.

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. Проте контроль за струмом витоку є коректним лише при рівномірному розподілі бруду відносно осі ізолятора.

При нерівномірному забрудненні поверхні ізолятора, зокрема – при секторному характері забруднення, одному і тому ж значенню струму витоку можуть відповідати різні його щільності й розрядні напруги [4]. Нерівномірність забруднення обумовлена тим, що ізолятори в комірках КРПЗ розташовують горизонтально, вертикально або під іншим кутом. На вертикально розташованих ізоляторах забруднення з усіх боків практично однакове. Натомість, при горизонтальному розміщенні спостерігається переважне осідання забруднюючих частинок на верхньому секторі ізолятора; або при конденсації вологи, навпаки – змивання їх з верхньої поверхні до нижньої і накопичення там у вигляді вузької секторної доріжки вздовж якої може розвинутихся перекриваюча ізолятор дуга навіть при незначному струмі витоку. Втім, навіть вертикальне розташування ізолятора не виключає секторного забруднення його поверхні, яке, наприклад, спостерігається, коли забруднення накопичується з підвітряної сторони [4].

Тому неможливо однозначно інтерпретувати результати контролю при невідомому куті сектора забруднення. Невизначеність сектора забруднення поверхні ізолятора унеможлиблює й корегування контролю шляхом простого вибору нових граничних рівнів критичного значення струму витoku.

Крім того, струм витoku залежить не тільки від ступеня забрудненості, а й від вологості оточуючого ізолятор повітря; так випадіння роси на поверхні ізолятора може спровокувати його перекриття навіть при незначному рівні забруднення [3].

Для підвищення точності та достовірності контролю забруднення нами запропоновано [5]:

- спорядити пристрій контролю давачем вологості оточуючого ізолятор повітря для коригування значення поверхневого струму витoku та перерахунку його значення на відносну вологість повітря 100% при якому значення поверхневого струму витoku максимальне;

- організувати контроль реактивної складової поверхневого струму витoku значення якого пропорційне ємності між забрудненим сектором та струмопровідною шиною, враховуючи її значення при обчисленні 50% розрядної напруги.

Для контролю реактивної складової в поверхневому струмі витoku необхідно визначати кут зсуву фаз між напругою і струмом. Моделювання комплексного струму витoku по поверхні ізолятора показало, що при критичних струмах витoku і малих секторах забруднення (порядку 1/4 поверхні) кут зсуву фаз може бути незначним (близько $0,1^\circ$), а це висуває жорсткі вимоги до точності та роздільної здатності приладу визначення малих кутів. До того ж, прецизійне вимірювання кута зсуву фаз ускладнюється наявністю нелінійного спотворення кривої напруги, спричиненого гармоніками. Це не дозволяє використовувати методи вимірювання, основані на реєстрації моменту переходу досліджуваного сигналу через нуль.

За таких обставин найбільш прийнятним, на нашу думку, є ортогональний спосіб визначення кута зсуву фаз з дискретною обробкою сигналів [6]. Цей метод дозволяє визначати кут між основними гармоніками в сигналах, які мають великий рівень нелінійних спотворень. Суть методу полягає в наступному. Кут φ зсуву фаз між прикладеною до ізолятора напругою та струмом витoku визначається з виразу:

$$\varphi = \varphi_U - \varphi_I \quad (1)$$

де φ_U – кут зсуву фаз між напругою і опорним сигналом,

φ_I – кут зсуву фаз між струмом і опорним сигналом.

Величини φ_U та φ_I знаходимо за формулами:

$$\varphi_U = \arctg 2 \left(\frac{a_{CU}}{a_{SU}} \right), \quad \varphi_I = \arctg 2 \left(\frac{a_{CI}}{a_{SI}} \right) \quad (2)$$

де $\arctg 2$ – функція обчислення арктангенса з урахуванням актантної логіки;

$$a_{CU} = \sum_{n=1}^p U(T_0 n) \cdot N \cdot \cos(2\pi f T_0 n), \quad a_{SU} = \sum_{n=1}^p U(T_0 n) \cdot N \cdot \sin(2\pi f T_0 n), \quad (3)$$

$$a_{CI} = \sum_{n=1}^p I(T_0 n) \cdot N \cdot \cos(2\pi f T_0 n), \quad a_{SI} = \sum_{n=1}^p I(T_0 n) \cdot N \cdot \sin(2\pi f T_0 n), \quad (4)$$

де n – номер відліку; p – кількість відліків в періоді сигналу; f – частота опорного сигналу; T_0 – час між відліками, $T_0 = T/p$, T – період сигналу, що досліджується

($\approx 0,02$ с); $U(T_0n)$ та $I(T_0n)$ – відповідно миттєве значення напруги і струму в точках відліку; $N \cdot \cos(2\pi f T_0n)$ та $N \cdot \sin(2\pi f T_0n)$ – відповідно косинусне та синусне значення опорного сигналу в точках відліку.

Враховуючи, що обробка проводиться в цифровому дискретному вигляді, миттєві значення напруги і струму, косинусного і синусного опорних сигналів в точках відліку можуть приймати лише цілі величини. При цьому максимально можливе значення буде відповідати прийнятій розрядності – 128 (7 біт), 256 (8 біт), 512 (9 біт) і т.д.

Отже, можливі три варіанти – коли розрядність АЦП, яким оцифровується сигнал, менша, дорівнює або більша розрядності опорного сигналу. Час між відліками T_0 може мати як постійне значення, так і адаптуватися відповідно до частоти сигналу – в цьому випадку слід вимірювати частоту або період сигналу.

Дослідимо похибку вимірювання фази між сигналом, який досліджується, та опорним від таких чинників: розрядності АЦП і опорного сигналу, ступеня використання цифрової шкали АЦП, кута зсуву фаз, кількості відліків у періоді сигналу, наявності гармонійної складової, відхилення частоти від номінальної. При обчисленні кута зсуву фаз скористаємось (2), (3) або (2), (4). Для моделювання дискретності при обчисленні значення оцифрованого та опорного сигналів округлимо їх до найближчого цілого значення, а амплітудне значення буде дорівнювати прийнятій розрядності.

При оцінці впливу похибок від кожного з перелічених чинників фіксуватимемо решту з них на апріорному рівні: розрядність сигналу, що вимірюється та опорного – 11 біт, шкала АЦП використовується на 80%, кут зсуву фаз змінюється від $0,1^\circ$ до 50° з дискретністю $0,1^\circ$ (500 значень кута), кількість відліків в періоді сигналу $p=40$, гармонійні складові в сигналі відсутні, частота точно відповідає 50 Гц.

Для оцінки похибки використаємо її середньоквадратичне значення:

$$\sigma_{ск} = \sqrt{\sum_{i=1}^{500} \left(\frac{\varphi_i - \varphi_0}{\varphi_0} \right)^2} / 500 \cdot 100\%$$

де φ_i – розраховане за (2), (3) або (2), (4) значення кута;

φ_0 – дійсне значення кута.

1. *Розрядність АЦП і опорного сигналу.* Результати обчислення похибки від дискретності представлення сигналу, що досліджується та опорного наведені в табл. 1.

Збільшення розрядності опорного сигналу до 9, 10, 11, 12 Біт практично не впливають на похибку. Отже видно, що із збільшенням розрядності АЦП похибка швидко зменшується (для нашого випадку цілком прийнятним є використання 12-бітного АЦП, при якому похибка не перевищуватиме 0,051%).

Таблиця 1. Значення середньоквадратичної похибки вимірювання фази від розрядності сигналу, що досліджується та опорного у 8 Біт.

Розрядність сигналу, що досліджується, Біт	8	9	10	11	12
$\sigma_{ск}, \%$	1,322	0,943	0,281	0,161	0,051

2. *Ступінь використання цифрової шкали АЦП.* При зменшенні значення сигналу, що досліджується нижче обраного рівня, цифрова шкала

використовуватиметься не повністю, що впливатиме на похибку вимірювання. Оцінимо цей вплив, розрахувавши її середньоквадратичне значення. Результати розрахунку наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Значення середньоквадратичної похибки вимірювання фази від величини використання цифрової шкали.

Відсоток використання цифрової шкали, %	10	20	40	60	80	100
$\sigma_{ск}$, %	1,318	0,942	0,281	0,235	0,161	0,067

Отже, із зменшенням відсотка використання шкали АЦП, особливо в зоні 10÷40%, похибка стрімко збільшується, тому бажано аби сигнал не був меншим принаймні за 20% коли $\sigma_{ск} < 1\%$.

3. *Кут зсуву фаз між сигналом, що досліджується та опорним.* Вплив кута зсуву фаз між сигналом, що досліджується та опорним на похибку вимірювання показано на рис. 1.

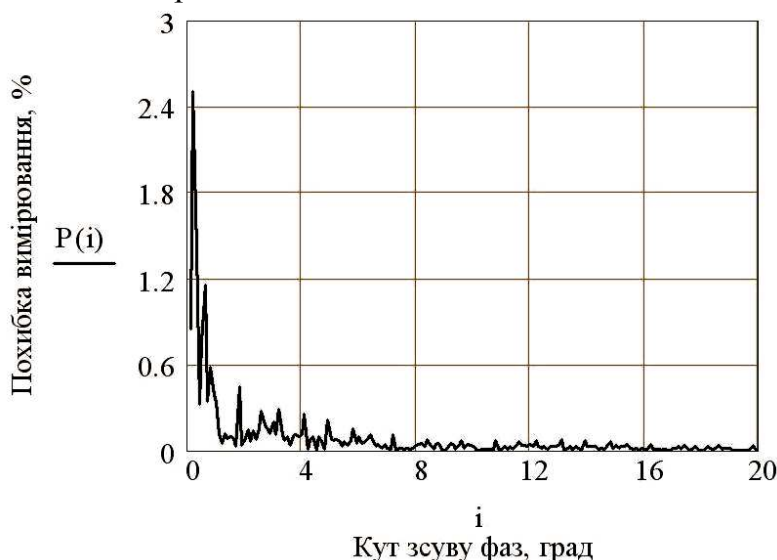


Рис. 1. Графік залежності значення похибки вимірювання кута зсуву фаз від його значення

Коливальний характер кривої обумовлюється дискретністю представлення сигналу, що досліджується та опорного. В цілому похибка вимірювання різко зменшується при збільшенні кута зсуву фаз понад 1° .

4. *Кількість відліків у періоді сигналу.* Найближча гармоніка в сигналі, яка призводить до спотворення результатів вимірювання $k=p-1$, де k – номер гармоніки [6]. Вибором кількості відліків p можливо мінімізувати вплив гармонік на результати вимірювання. Але кількість відліків в періоді сигналу також впливає і на похибку вимірювання. Обчислення середньоквадратичної похибки вимірювання в залежності від p показало, що вона має складний характер, причому максимальне значення $\sigma_{ск}=0,8\%$ спостерігається при $p=8$, а при $p>16$ похибка $\sigma_{ск}$ взагалі не перевищує $0,4\%$.

5. *Наявність гармонійних складових у сигналі.* Якщо в сигналі є гармонійні складові з номером гармоніки до $p-1$, то це призводить до появи похибки вимірювання кута зсуву фаз. Обчислимо середньоквадратичну похибку

вимірювання в залежності від номера гармоніки k та коефіцієнта несинусоїдності K_H . За результатами розрахунку побудовані графіки на рис. 2.

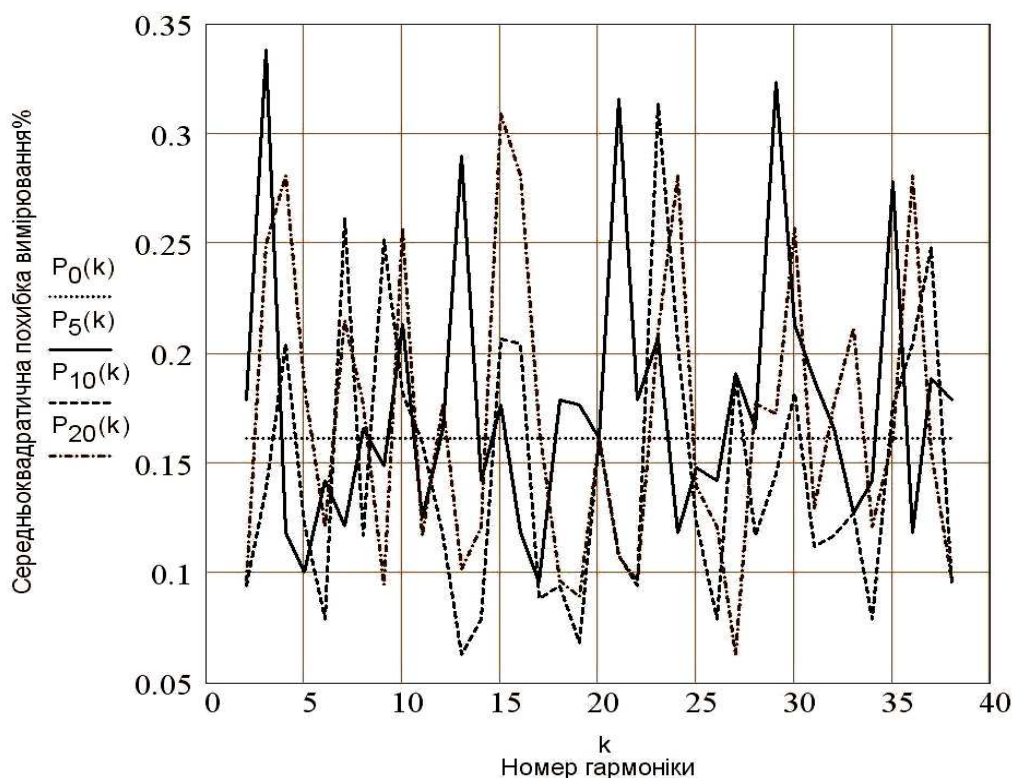


Рис. 2. Графіки залежності середньоквадратичної похибки вимірювання кута зсуву фаз від гармонійної складової в сигналі ($P_0(k)$ при $K_H=0\%$, $P_5(k)$ при $K_H=5\%$, $P_{10}(k)$ при $K_H=10\%$, $P_{20}(k)$ при $K_H=20\%$)

Із графіку видно, що найбільший пік похибки $P_5(k)=0,34\%$ спостерігається при $k=3$.

6. *Відхилення частоти від номінальної.* При відхиленні частоти в мережі від номінальної (50 Гц), значення часу T_0 між відліками також відхилиться від розрахункового $0,02/p$, а це, в свою чергу, призведе до появи додаткової похибки вимірювання. На рис. 3 наведений графік залежності середньоквадратичної похибки вимірювання різниці фаз від частоти при аварійно допустимих її коливаннях ($\pm 0,4$ Гц).

Підвищити точність вимірювання різниці фаз можна, якщо знати достатньо точно частоту живлення (точність вимірювання частоти може сягати $\pm 0,001$ Гц) або період – тоді можна відповідним чином коригувати значення часу між відліками T_0 АЦП. Регулювання T_0 в залежності від частоти показало, що воно майже повністю виключає вплив відхилення частоти на середньоквадратичну похибку вимірювання.

Комплексна дія факторів. Із аналізу факторів, які суттєво впливають на точність вимірювання слід зазначити наступні: розрядність АЦП, використання шкали АЦП, кут зсуву фаз між сигналом, що досліджується та опорним, наявність гармонік в сигналі (особливо третьої при $K_H=5\%$).

Конструктивними та програмними заходами можна мінімізувати вплив на похибку вимірювача фази таких чинників, як розрядність АЦП та коливання частоти мережі. Решта факторів носить випадковий характер і тому, слід оцінювати похибку вимірювання кута при їх найгіршій комбінації.

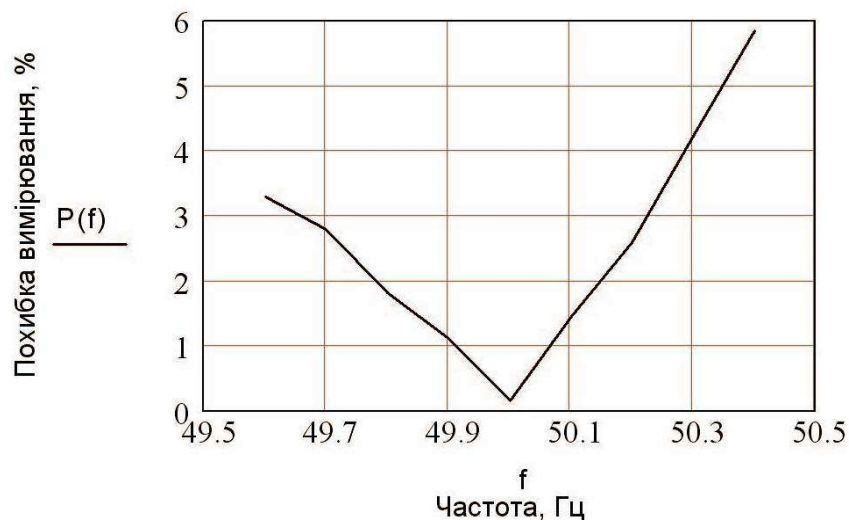


Рис. 3. Графік залежності середньоквадратичної похибки вимірювання кута зсуву фаз від відхилення частоти в мережі при постійному значенні часу між відліками 0,0005 с.

Оцінимо похибку вимірювання кута зсуву фаз при найгіршому поєднанні таких факторів, як використання шкали АЦП на 10% та наявність третьої гармоніки з $K_n=5\%$ при зміні кута від $0,1^\circ$ до 50° . Дослідження показало, що найбільша похибка 46% відповідає лише одному значенню кута $0,1^\circ$, водночас при інших кутах похибка не перевищує 5%.

Слід зазначити, що при критичному рівні забруднення активна складова в поверхневому струмі витоку значно превалює над реактивною і найменші значення кута зсуву фаз вимірюватимуться при значно більшому ніж 10% використанні шкали АЦП. Тому навіть за самих несприятливих умов контролю похибка вимірювання кута $0,1^\circ$ не перевищуватиме 5%, а при кутах понад 4° похибка буде меншою за 1%, що є цілком прийнятним при діагностиці стану ізоляторів з різноманітним секторним забрудненням.

Література

1. Орлович А.Ю., Котиш А.І., Серебренніков С.В. Автоматизована система контролю за станом ізоляції в повітряних мережах напругою 10-35 кВ // Технічна діагностика та неруйнівний контроль. - 2000. - №4. - С.62-65.
2. Федосеєнко Р.Я., Мельников А.Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.
3. Серебренніков С.В., Сіріков О.І. Вибір інформативних параметрів для контролю забрудненості високовольтних 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. Мерхалев С.Д., Соломоник Е.А. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.
5. Патент України №25587 МПК H02N 7/26 Спосіб контролю ступеня забрудненості поверхні ізоляторів під напругою / Сіріков О.І. – надр. 10.08.2007. Бюл. №12.
6. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь, 1993. 184 с.