

Є.В.Чорноус

## МАТЕМАТИЧНА ОСНОВА ТА МЕЖІ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ШВИДКОДЮЧОГО СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНОЇ ФАЗИ

*Визначення межі статичної стійкості нового способу визначення пошкодженої фази електричної мережі з похибкою до 40 електричних градусів.*

*К л ю ч о в і с л о в а: електрична мережа, пошкодження фази, спосіб визначення, похибка*

**Постановка проблеми.** Для обмеження струмів витоку в шахтних низьковольтних мережах із ізольованою нейтраллю в теперішній час застосовуються різні методи. Найбільш поширеними є пристрої із статичними або автоматичними компенсаторами, основна ідея яких полягає в обмеженні реактивної (ємнісної) складової струму витоку за рахунок паралельно включеній індуктивності. Головною складністю таких апаратів виявляється коректне налаштування компенсуючої індуктивності в резонанс з ємністю мережі та забезпечення надійної роботи апаратної частини компенсуючих пристроїв [1]. Існуюча тенденція до підвищення енергоємності забійних та очисних робіт, а також викликане цим підвищення рівня напруги розподільчих мереж, спонукають до пошуку досконаліших методів і пристроїв, що забезпечують захист підземного персоналу від ураження електричним струмом і інших небезпечних наслідків виникнення струмів витоку.

Перспективним напрямом в цій області являється захисне шунтування пошкодженої фази, що полягає в її автоматичному з'єднанні із заземлюючим пристроєм [2]. Це вимагає забезпечення надійної роботи пристрою вибору пошкодженої фази (ВПФ) при досить високій його швидкодії.

**Аналіз публікацій і досліджень.** Одним з основних складнощів реалізації захисного шунтування є гарантоване і надійне визначення пошкодженої фази електричної мережі. Умисне замикання «здорової» фази на землю приводить до режиму двофазного замикання на землю в рознесених точках заземлюючого контуру. Наші дослідження [3] вказують на те, що подібний режим недопустимий через низку обставин, з яких можна виділити наступні:

а) людина, що попала під фазну напругу, при шунтуванні «здорової» фази виявляється під лінійною напругою і сила струму замикання обмежується тільки опором його тіла, що неприпустимо з точки зору електробезпеки;

б) струм замикання, проходячи через відкриті ділянки заземлюючого контуру, може визивати небезпечні дугоутворення в місцях активного виділення метану і вугільного пилу, що неприпустимо з точки зору пожежної та

вибухової безпеки.

У [4, 5] описаний швидкодіючий алгоритм ідентифікації пошкодженої фази, заснований на визначенні аргументу потенціалу нейтралі по двом його миттєвим значенням  $u_N(t_1)$  і  $u_N(t_2)$ , знятих для двох суміжних значень аргументу  $\omega t_1$  і  $\omega t_2$ . Сутність пропонованого швидкодіючого способу визначення аварійної фази полягає в розрахунку аргументу (початкової фази) потенціалу нейтралі  $\psi$  на основі двох його миттєвих значень, зафіксованих в суміжні моменти часу  $\omega t_1$  та  $\omega t_2$ , різниця між якими  $\Delta\omega t$  фіксована і складає від 10 до 20 градусів періоду промислової частоти. Такі проміжні значення слідує один за одним з частотою 0,9...1,8 кГц і перевіряються на приналежність до одного з трьох опорних фазових інтервалів, а кінцеве рішення на спрацювання захисту приймається на основі серії від 5 до 15 таких результатів в залежності від інтенсивності завад та збурень з боку мережі.

Алгоритм визначення проміжного значення аргументу потенціалу нейтралі  $\psi$  базується на рішенні системи двох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} u_N(t_1) &= U_{N\max} \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi); \\ u_N(t_2) &= U_{N\max} \cdot \sin(\omega \cdot t_2 + \psi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де  $u_N(t)$ ,  $U_{N\max}$ ,  $\psi$  – миттєве значення, амплітуда та аргумент (початкова фаза) потенціалу нейтралі відносно землі.

Виключивши з системи (1) амплітуду  $U_{N\max}$ , одержуємо функцію  $y(\psi)$ , яка стає основним «інструментом» для пошуку коренів  $\psi$ :

$$y(\psi) = \frac{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi)}{\sin(\omega \cdot t_1 + \Delta\omega t + \psi)} - \frac{u_N(t_1)}{u_N(t_2)}. \quad (2)$$

Для визначення властивостей одержаної функції розглянемо для двох її змінних  $\psi$  та  $\omega t$  об'ємний та контурний графіки, що приведені на рисунку 1. Їх аналіз показує, що функція (2) має розриви другого роду і, отже, пошук коренів повинен здійснюватись в надзвичайно «гористому» просторі. Крім того, залежність (2) на інтервалі  $0 \dots 2\pi$  має два корені, один з яких сторонній і повинен відкидатись. Частково ці недоліки залежності (2) можна компенсувати наступним [5]:

а) застосувати умову, що дозволяє ігнорувати вихідні дані, які попадають в зону «бар'єру»

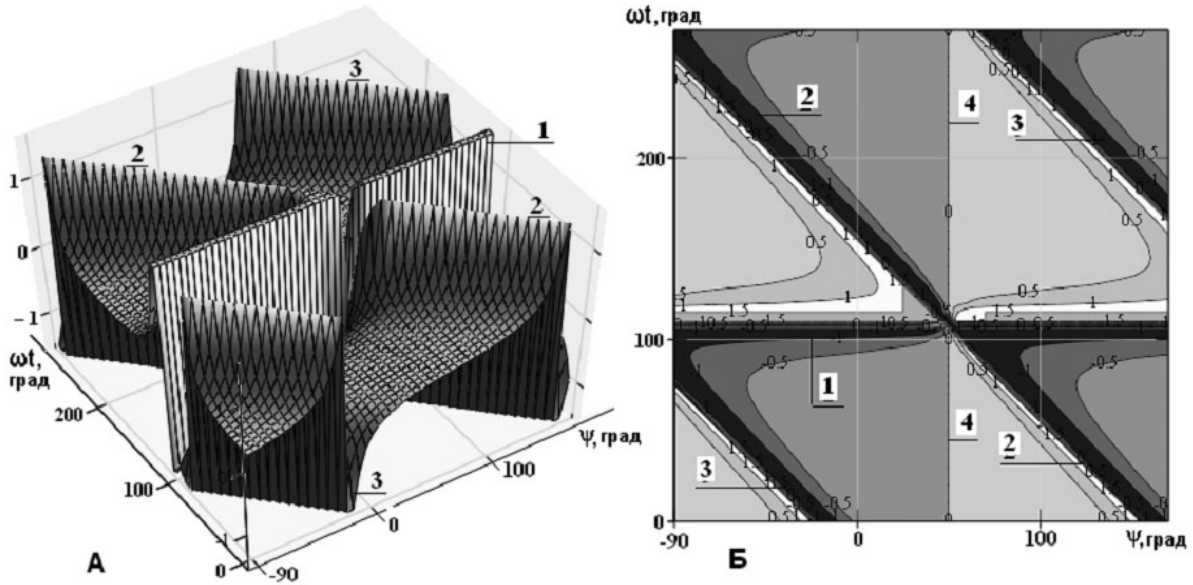
$$0,1 < |u_N(t_1)/u_N(t_2)| < 10,0;$$

б) застосувати умову, при невиконанні якої відкидається сторонній корінь

$$U_{N\max} = \frac{u_N(t_1)}{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi_1)} > 0.$$

Графіки на рисунку 1 побудовані за умовою відсутності в мережі будь-яких збурень чи спотворень. В дійсності алгоритм та пристрій ВПФ, виходячи з вимог максимальної швидкодії, працюють в умовах інтенсивних завад та спотворень, на які діють наступні фактори:

- а) динамічні складові перехідного процесу, що супроводжують витік;
- б) поперечна або повздовжня несиметрія мережі;
- в) наявність вищих гармонік у складі потенціалу нейтралі;
- г) неточності зчитування або обробки даних;
- д) стрибкоподібна зміна опору витоку, що приводить до накладання нового перехідного режиму на незакінчений попередній;
- е) інші фактори, які не завжди можна передбачити (збурення в роботі потужних приводів, комутаційні завади у мережі і т. п.).



1 – основний «бар'єр» (стрибок в нескінченність), що паралельний осі  $\psi$ ;  
 2, 3 – додаткові «бар'єри», що відповідають умові  $(\omega \cdot t_2 + \psi = 0, \pi, 2\pi$  і т.д.) і розташовані під кутом до осі  $\psi$ ; 4 – лінія нульового значення функції (2), тобто годограф її коренів

Рисунок 1 – Об'ємний та контурний графіки функції (2)

**Мета статті.** Визначення меж стійкості запропонованого способу ВПФ і алгоритму його реалізації до завад і збурень мережі незалежно від їх фізичної сутності.

**Результати досліджень.** Під стійкістю алгоритму та пристрою ВПФ, що його реалізує, будемо вважати їх здатність безпомилково визначати аварійну фазу мережі, тобто фазу, в якій виявлено витік струму на землю, незважаючи на протидію збурюючих чи спотворюючих факторів. Для кількісної характеристики статичної стійкості алгоритму, тобто стійкості в усталеному режимі однофазного витоку, введемо коефіцієнт похибки  $k_n$ , що являє собою відношення фактичних значень вихідних даних  $u_{N\Phi}(t_1)/u_{N\Phi}(t_1+\Delta t)$ , одержаних при дії збурюючих факторів, до того ж відношення даних, вільних від дії будь-яких збурень або завад:

$$k_n = \frac{u_{N\Phi}(t_1)}{u_{N\Phi}(t_1 + \Delta t)} \cdot \frac{u_N(t_1 + \Delta t)}{u_N(t_1)}$$

З використанням цього коефіцієнту функція (2) стає функцією трьох змінних і приймає вид:

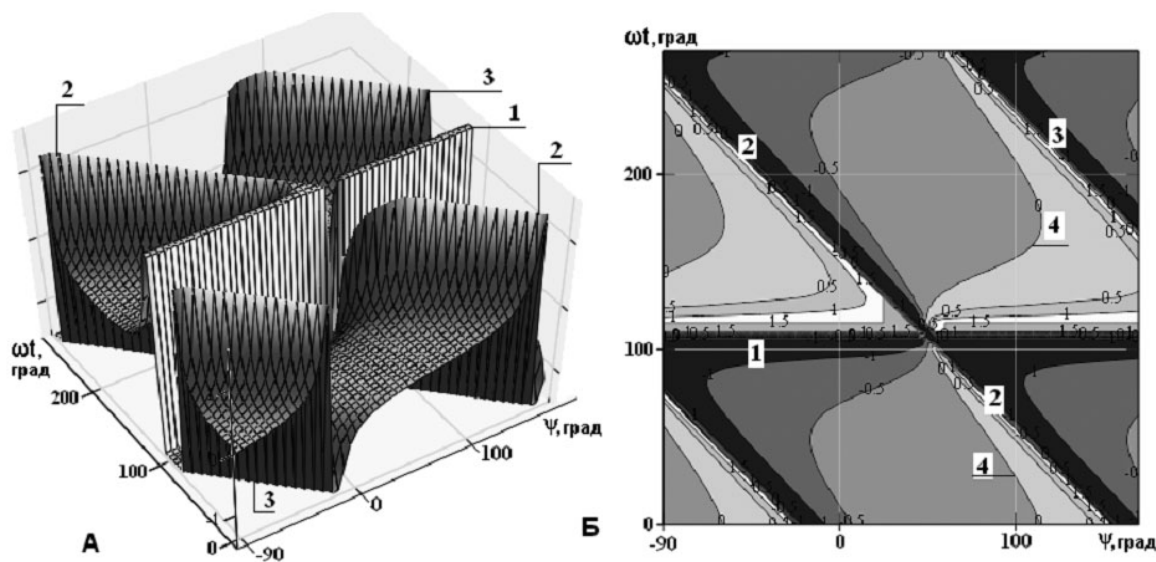
$$y(t, \psi, k_n) = \frac{\sin(\omega \cdot t + \psi)}{\sin(\omega \cdot (t + \Delta t) + \psi)} - \frac{u_N(t)}{u_N(t + \Delta t)} \cdot k_n. \quad (3)$$

Введення коефіцієнту  $k_n$  дає можливість кількісно оцінити абсолютну похибку у визначенні аргументу потенціалу нейтралі  $\psi$  незалежно від конкретного фактору, що до неї призводить.

На рисунку 2 приведені результати, аналогічні тим, що зображені на рисунку 1, але з коефіцієнтом похибки  $k_n = 1,25$ . Фактично це означає, що внаслідок дії одного із збурюючих факторів (незалежно якого) відношення вхідних даних  $u_N(t_1)/u_N(t_1 + \Delta t)$  змінено на 25 % в сторону його збільшення. Порівняння двох пар рисунків, що виконані в одних і тих же умовах, за виключенням коефіцієнта похибки  $k_n$ , дозволяє зробити важливі висновки:

а) конфігурація «бар'єрів» (стрибків функції в нескінченність) практично не змінюється. Це добре видно з порівняння об'ємних та контурних графіків;

б) лінії одного рівня суттєво змінили свою конфігурацію. Зокрема, лінія нульового значення (геометричне місце коренів функції) змістилась вправо (в сторону збільшення аргументу  $\psi$ ), зберігаючи свою періодичність ( $0 \dots \pi$ ) відносно обох своїх змінних. Причому, найбільше відхилення (максимальна абсолютна похибка) досягає майже  $70^\circ$ . В той же час в області основного бар'єру є «вікно», через яке проходить лінія нульового рівня і де абсолютна похибка наближається до нуля.



1 – основний «бар'єр»; 2, 3 – додаткові «бар'єри» згідно умови  $\omega \cdot t_2 + \psi = 0, \pi, 2\pi$  і т. д.; 4 – лінія нульових значень  $\psi$  (кореневий годограф)

Рисунок 2 – Об'ємний та контурний графіки функції (3) при  $k_n = 1,25$

Аналогічне дослідження, виконане для  $k_n = 0,75$  (відношення вхідних даних  $u_N(t_1)/u_N(t_1 + \Delta t)$  змінено на 25 % в сторону його зменшення), дало ті ж результати по відношенню до розміщення «бар'єрів» функції (3). Проте по-

ложення ліній однакового рівня міняється на протилежне. Зокрема, нульова лінія (годограф коренів функції) зміщується вліво, тобто в сторону зменшення значення коренів, причому значення абсолютної похибки, як і в попередньому випадку, знаходиться в межах  $0 \dots 70$  градусів.

Принципово можливі дві пропозиції по підвищенню статичної стійкості пристрою ВПФ. Перша з них полягає в тому, що рішення на спрацювання захисного шунтування приймається не по серії однотипних проміжних результатів, як це запропоновано в [4, 5], а по середньому значенню цієї серії  $\psi_{cp}$ :

$$\psi_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \psi_i.$$

При цьому можливий випадковий «стрибок» одного чи двох проміжних результатів за межі «свого» опорного інтервалу не має вирішального значення і не приводить до затримки процесу ідентифікації аварійної фази із-за необхідності очікування наступної стійкої однотипної серії.

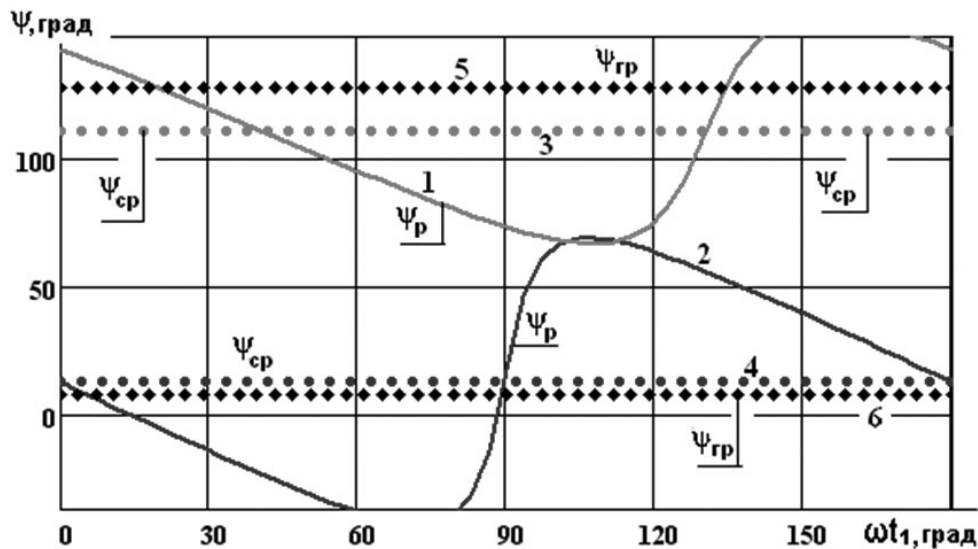
Друга пропозиція полягає в зміщенні меж опорних фазових інтервалів в функції опору витoku  $R_h$  або, що те ж саме, в функції амплітудного значення потенціалу нейтралі. Дійсно, фактичне значення аргументу  $\psi_\phi$  з ростом опору витoku зміщується до нижньої межі опорного інтервалу. В ідеальному випадку останні повинні бути зміщені згідно умови:

$$\alpha_{cp} = \psi_\phi \pm 60^\circ. \quad (4)$$

Оскільки точне виконання умови (4) за браком інформації неможливе, для визначення порогу стійкості алгоритму до збурень та завад з боку мережі подальше дослідження виконується з урахуванням першої пропозиції. Його результати приведені на рисунку 3 для наступних умов: витік в фазі А, номінальна напруга мережі  $U = 660$  В, ємність фази мережі відносно землі  $C = 1$  мкФ, опір ізоляції між фазою мережі і землею  $R = 150$  кОм, опір витoku  $R_h = 10$  кОм, коефіцієнти похибки  $k_n = 0,6$  і  $k_n = 1,4$  (40 %-е відхилення відношення  $u_N(t_1)/u_N(t_2)$  від свого дійсного значення), фактичне значення аргументу потенціалу нейтралі по даним математичної моделі  $\psi_\phi = 68^\circ$ , опорна напруга системи відліку –  $u_{AB}$ .

Особливість цього дослідження в порівнянні з попереднім полягає в тому, що допустима похибка, при якій алгоритм ВПФ ще зберігає свою стійкість до завад та спотворень, збільшилась майже в два рази. Більш того, при цьому зберігається запас стійкості по верхній межі  $17^\circ$ , а по нижній –  $6^\circ$ .

Якщо прийняття кінцевого рішення здійснюється на основі середнього значення  $\psi_{cp}$  серії проміжних результатів, допустима похибка відношення вхідних даних  $u_N(t_1)/u_N(t_2)$ , незалежно від причини, що до неї призводить, підвищується в 2 рази і становить  $\pm 40\%$ . При цьому абсолютна похибка у визначенні проміжних результатів  $\psi$  досягає  $\pm 40^\circ$ . Ці значення можна було б вважати межею статичної стійкості алгоритму ВПФ, проте останній має ще невикористаний резерв – зміщення опорних фазових інтервалів.



1 – розрахункові значення аргументу  $\psi$  при  $k_n = 1,4$ ; 2 – те ж при  $k_n = 0,6$ ;  
 3 – верхнє середнє значення аргументу  $\psi_{ср} = 111^\circ$ ; 4 – нижнє середнє  
 значення  $\psi_{ср} = 13^\circ$ ; 5 – верхня межа опорного інтервалу  $\psi_{ср} = 128^\circ$ ;  
 6 – нижня межа опорного інтервалу  $\psi_{ср} = 8^\circ$

Рисунок 3 – Криві залежності  $\psi(\omega t)$  при  $k_n = 1 \pm 0,4$

**Висновок.** Таким чином, межі стійкості запропонованого способу ВПФ і алгоритму його реалізації до завад і збурень мережі незалежно від їх фізичної сутності визначені.

#### Список літератури

1. Задорожний В.И. Анализ надежности аппаратов защиты от токов утечки в электрических сетях угольных шахт напряжением до 1000 В /В.И. Задорожний // Взрывозащищенное электрооборудование: сб.науч. тр. УкрНИИВЭ.-Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006.-С.110-112.
2. Шуцкий В. И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И.Шуцкий, В.О.Жидков, Ю.Н.Ильин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
3. Черноус Е.В. Моделирование режима заземляющего контура при двухфазном замыкании шахтной участковой сети в разнесенных точках / Е.В.Черноус // Донбас-2020: наука і техніка – виробництву: матеріали II науково-практичної конференції, м.Донецьк, 03-04 лютого 2004 р. - Донецьк: ДонНТУ, 2004.- С.353-357.
4. Черноус Е.В. Об альтернативном варианте защиты шахтной участковой сети от однофазной утечки / Е.В.Черноус // Электричество.- 2009.- №8.- С.33-36.
5. Патент UA на корисну модель № 51307, Україна, МПК H02H 3/16, G01R 31/08. Спосіб визначення пошкодженої фази з витокм на землю в електричній мережі з ізольованою нейтраллю / Є.В.Черноус.-u201000703; заявл. 25.01.2010; опубл. 12.07.2010. Бюл. № 13.