

**А.В.Журахівський**, докт.техн.наук, **Б.М.Кінаш**, канд.техн.наук, **А.Я.Яцейко**, канд.техн.наук, **Р.Я.Масляк** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів)

## АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ В УМОВАХ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ДІЯНЬ

*Розглянуто питання виникнення ферорезонансних процесів в електромережах 6–35 кВ та їхнього негативного впливу на роботу, в першу чергу, трансформаторів напруги. Викладено основні положення оцінки надійності роботи останніх.*

*Рассмотрены вопросы возникновения феррорезонансных процессов в электросетях 6–35 кВ и их отрицательного влияния на работу, в первую очередь, трансформаторов напряжения. Изложены основные положения оценки надежности работы последних.*

**Вступ.** Електромагнітні трансформатори напруги (ТН) використовуються в електричних мережах для живлення кіл напруги приладів обліку електроенергії, релейного захисту та автоматики, для контролю ізоляції та вимірювання напруги на шинах підстанцій (ПС). Вони є важливими та відповідальними елементами електричних мереж, до яких ставляться високі вимоги стосовно надійності. В той же час ТН досить часто пошкоджуються, особливо в мережах 6–35 кВ з ізольованою нейтраллю; згідно із статистичними даними – 5–12% на рік.

У роботах [1,2] проаналізовано функціонування трансформаторів напруги в мережах 6–35 кВ енергокомпанії «Харківобленерго» і наведена статистика пошкоджуваності різних типів ТН. Деякі статистичні дані, отримані авторами робіт [1,2], наведено нами в таблиці. Вражає масовість відмов ТН та підвищена інтенсивність відмов в окремі роки.

Рік			1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Кількість пошкоджених ТН, шт.			19	22	18	19	16	17	28	37
Частка від кількості встановлених, %			5,2	6,1	5,0	5,2	4,4	4,7	7,7	10,2
2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009		
69	49	49	28	24	25	26	22	16		
19,1	13,5	13,5	7,7	6,6	6,8	7,1	6	4,4		

Причини масових відмов ТН в мережах 6–35 кВ з ізольованою нейтраллю відомі – це, в першу чергу, ферорезонансні процеси (ФРП), зумовлені ємністю мережі на землю та нелінійною індуктивністю вітки намагнічення ТН.

На рис. 1 показана принципова схема підстанції, силовий трансформатор якої Т живить два приєднаних до шин фідери  $W_1$  і  $W_2$ , з еквівалентними ємностями їх на землю  $C_1$  та  $C_2$ . На шинах встановлено електромагнітний вимірювальний трансформатор напруги ТН. Нейтраль силового трансформатора з боку мережі 35 кВ ізольована. В точці  $K^{(1)}$  виникло однофазне замикання на землю. Струм замикання на землю  $I_3$  дорівнює сумі ємнісного струму мережі  $I_C$  та індуктивного струму  $I_L$  вітки намагнічення ТН. Вітки струмів  $I_C$  та  $I_L$  паралельні.

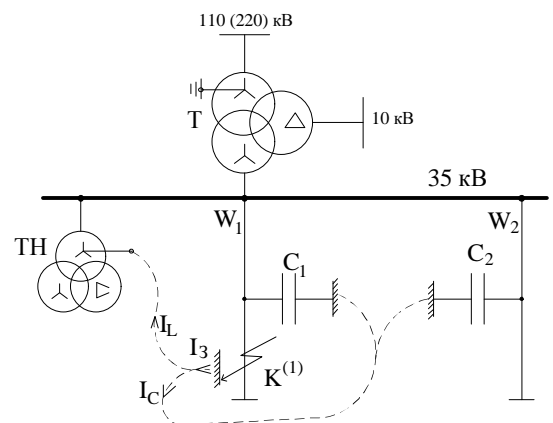


Рис. 1

Якщо замикання на землю раптово ліквідується, то вітки  $I_C$  та  $I_L$  і далі залишаються паралельними (рис. 2, а), але вже відносно напруги фази джерела живлення (трансформатора Т на рис. 1) відносно землі. Коли існувало однофазне замикання на землю, фазні напруги непошкоджених фаз мали значення лінійних, тобто  $\sqrt{3}U_{\phi n}$ . Коли ж однофазне замикання на землю ліквідується, то на фазах відносно землі ще деякий час залишається напруга, підвищена до рівня  $(1,1-1,4)U_{\phi n}$ . Це провокує суттєве зростання струму  $I_L$  вітки намагнічення ТН та ємнісного струму  $I_C$  мережі, тобто започатковує ферорезонанс.

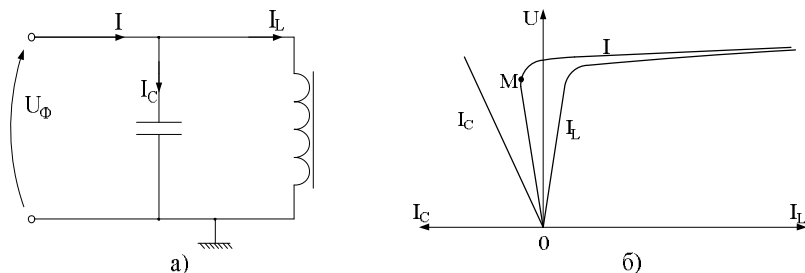


Рис. 2

Ферорезонанс підтримується, коли струм джерела  $I$  в межах часу кожного періоду змінює фазу на  $180^\circ$ , тобто з ємнісного переходить у індуктивний і навпаки. Цій умові відповідає перехід струму  $I$  через екстремальне (точка  $M$  на рис. 2, б) та нульове значення. Відсутність екстремальної точки  $M$  означає, що струм  $I$  в межах часу кожного періоду буде тільки індуктивним або тільки ємнісним. Першій умові відповідає інтервал ємностей мережі  $(0; C_{\min})$ , а другій умові – інтервал  $(C_{\max}; \infty)$ . Отже, ферорезонанс можливий, якщо ємність мережі знаходиться в деякому інтервалі  $(C_{\min}; C_{\max})$  або ємнісний струм потрапляє в інтервал значень  $(I_{c \min}; I_{c \max})$ . Інтервали вказаних значень ємностей мережі (за яких виникає ФРП) залежать від характеристики намагнічення ТН і для різних типів трансформаторів вони можуть бути розраховані або зняті експериментально. Знання інтервалу значень  $(C_{\min}; C_{\max})$  необхідне для аналізу надійності функціонування ТН.

Ємність мережі має визначальний вплив на виникнення ферорезонансних процесів. Але впливають на них також інші чинники: опір  $R_n$  навантаження вторинної обмотки ТН; погодні умови, які можна еквівалентувати активною провідністю  $g$  мережі на землю; рівень напруги  $U$  мережі в передаварійний момент тощо. Кожна з названих величин є випадковою, а разом вони формують багатомірний вектор  $\vec{x}$  випадкових величин, який, діючи на ТН, спричинює або не спричинює появу ферорезонансних процесів

$$\vec{x} = (C, R_n, g, U). \quad (1)$$

Чинники  $C, R_n, g, U$ , тобто складові вектора  $\vec{x}$ , ще називають параметрами (координатами) вектора  $\vec{x}$ . Такою назвою будемо користуватися надалі.

Крім однофазних замикань на землю, зумовлених обривами і падіннями на землю проводів повітряної лінії та порушеннями ізоляції однієї з фаз, поштовхом до розвитку ферорезонансних процесів можуть бути також спрацювання розрядників, короткочасне перекриття фазної ізоляції під час падіння дерев чи грозозахисних тросів на проводи повітряної лінії, деякі комутації ліній тощо. А наслідком ферорезонансних процесів є, як правило, термічний характер пошкоджень обмоток високої напруги ТН, оскільки під час ферорезонансу струми в цих обмотках на порядок і більше перевищують їхні допустимі значення. Трансформатори напруги виходять з ладу через 3–5 хв від початку ферорезонансу. Враховуючи значні матеріальні збитки від пошкоджень ТН та порушень режимів під час ферорезонансів, зараз інтенсивно розробляються заходи щодо зниження рівня пошкоджуваності та створення нових типів і, насамперед, нерезонуючих ТН.

**Задача досліджень.** З огляду на ці обставини важливого значення набуває дослідження надійності роботи ТН в умовах виникнення в мережах ферорезонансних процесів (в умовах ферорезонансних діянь). Такі дослідження можливі на базі методів аналізу надійності функціонування фізичних об'єктів в умовах зовнішніх діянь [3]. Загальновідомі методи аналізу надійності, які ґрунтуються на засадах врахування випадкових змін станів досліджуваних об'єктів, тут не придатні. Але й застосування методів аналізу, які враховують зовнішні діяння, не просте, бо вимагає чітких знань законо-

мірностей виникнення резонансних явищ і врахування значної кількості випадкових чинників, що впливають на появу ферорезонансних процесів.

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунки надійності функціонування ТН в мережах з ізолюваною нейтраллю зводяться до обчислення частоти  $\omega$  їхніх відмов (пошкоджень), тобто кількості відмов за рік. За цим показником легко встановлюються всі інші показники надійності. Зважаючи на те, що відмови ТН наступають практично у кожному випадку виникнення ферорезонансних процесів (якщо не застосовуються заходи зриву ФРП), частоту  $\omega$  будемо вважати рівною частоті появи цих процесів, яку можна визначити як добуток кількості  $n$  однофазних замикань на землю впродовж року на ймовірність  $q$  виникнення ферорезонансного процесу в одному замиканні на землю

$$\omega = nq. \quad (2)$$

Величину  $n$  встановлюють за даними статистики, а величину  $q$  розраховують за методами аналізу надійності фізичних об'єктів в умовах зовнішніх діянь [3], які дозволяють розраховувати ймовірність  $q$  відмови об'єкта в разі одного зовнішнього діяння за формулою

$$q = \int_{D_x} \dots \int f(\vec{x}) \prod_{\kappa=1}^n dx_{\kappa}, \quad (3)$$

де  $x_{\kappa}$  –  $\kappa$ -та складова багатовимірного вектора  $\vec{x}$ ;  $n$  – кількість складових;  $f(\vec{x})$  – функція густини розподілу вектора  $\vec{x}$ ;  $D_x$  – область інтегрування або область значень  $x_1 \dots x_n$ , за потрапляння в яку вектора  $\vec{x}$  настає відмова об'єкта (іншими словами  $D_x$  – це область небезпечних значень параметрів вектора  $\vec{x}$ ).

Якщо складові вектора  $\vec{x}$  незалежні, то вираз (3) набуває вигляду

$$q = \int_{D_x} \dots \int \prod_{\kappa=1}^n f(x_{\kappa}) dx_{\kappa} = \int_{D_x} \dots \int \prod_{\kappa=1}^n dF(x_{\kappa}), \quad (4)$$

де  $f(x_{\kappa})$  – функція густини розподілу  $\kappa$ -ої складової вектора  $\vec{x}$ ;  $dF(x_{\kappa})$  – диференціал функції розподілу  $\kappa$ -ої складової вектора  $\vec{x}$ .

Замінивши інтеграли на скінченні суми, а диференціали  $dF(x_{\kappa})$  на прирости  $\Delta F(x_{\kappa})$  функцій розподілу на відрізках  $\Delta x_{\kappa}$  параметрів  $x_{\kappa}$ , отримаємо можливість розраховувати величину  $q$  шляхом чисельного інтегрування

$$q = \sum_{x_1 \in D_x} \Delta F(x_1) \dots \sum_{x_{\kappa} \in D_x} \Delta F(x_{\kappa}) \dots \sum_{x_n \in D_x} \Delta F(x_n) = \prod_{\kappa=1}^n \sum_{x_{\kappa} \in D_x} \Delta F(x_{\kappa}). \quad (5)$$

Для проведення обчислень за формулою (5) необхідно знати функції розподілу всіх складових вектора  $\vec{x}$  та область  $D_x$  небезпечних значень цих складових.

Стосовно ферорезонансних процесів у мережах з трансформаторами напруги формула (5) набуває вигляду  $q_{\phi} = \sum_{C \in D_{\phi}} \Delta F(C) \sum_{R_n \in D_{\phi}} \Delta F(R_n) \sum_{g \in D_{\phi}} \Delta F(g) \sum_{U \in D_{\phi}} \Delta F(U)$ , (6)

де  $q_{\phi}$  – ймовірність виникнення ферорезонансу під час одного замикання на землю в мережі з ТН;  $D_{\phi}$  – область значень складових вектора  $\vec{x}$ , за яких виникає ферорезонанс в ТН, тобто область небезпечних значень параметрів.

Як бачимо, для обчислення ймовірності  $q_{\phi}$  потрібні відомості про функції розподілу параметрів  $C, R_n, g, U$  та про межі області  $D_{\phi}$  небезпечних поєднань параметрів  $C, R_n, g, U$ . Тільки за такої умови можливе розв'язання задачі про надійність функціонування ТН в мережах з ізолюваними нейтралями.

Ємність  $C$  конкретної мережі залежить від кількості фідерів, увімкнених до шин ПС, та від їхньої довжини. Кількість фідерів змінюється, бо вони вимикаються для планових та аварійних ремонтів, у режимах мінімуму навантаження тощо. У кожний момент часу на ПС працює та чи інша комбінація увімкнених фідерів. У разі наявності на ПС трьох фідерів різної довжини утвориться вісім різних дискретних значень ємності  $C$ . Ці ємності легко розраховуються, але для побудови кривої  $F(C)$  необхідно ще врахувати тривалість існування кожної з цих комбінацій. Ймовірність  $p_c$  заданого зна-

чення ємності  $C$  дорівнює відношенню кількості годин  $t_c$  впродовж року, протягом яких ця ємність існує, до загальної кількості годин  $T$  у році ( $T = 8760$  год)

$$p_c = t_c / 8760. \quad (7)$$

Знаючи ймовірності дискретних значень ємностей, неважко побудувати дискретну функцію розподілу та апроксимувати її відповідним аналітичним виразом.

Для побудови функції розподілу  $F(R_n)$  вторинного навантаження  $R_n$  трансформатора напруги необхідно в межах енергокомпанії зібрати статистичні дані про навантаження ТН досліджуваного типу та отриманий статистичний ряд перевести у функцію розподілу за відомими правилами.

Природні умови також суттєво впливають на виникнення ферорезонансних процесів у мережах з ТН. Такі процеси не виникають під час сильного снігу, дощу, ожеледі, густого туману тощо. У періоди погіршення природних умов різко зростає активна провідність  $g$  ліній на землю, яка не дозволяє процесові розвинутися навіть у разі, коли інші умови будуть сприятливими. Функцію  $F(g)$  можна побудувати за даними метеорологічних спостережень.

Напруга  $U$  на шинах різних ПС різна і може відрізнятися від номінальної на  $\pm 15\%$ . Якою буде напруга на шинах конкретної ПС до початку формування ферорезонансного процесу можна оцінити тільки з певною ймовірністю. Закон розподілу напруги – нормальний з середнім значенням, близьким до номінального. Параметри розподілу для конкретної ПС можна встановити тільки шляхом обробки статистичних даних.

Область  $D_\phi$  не можна описати аналітично через велику кількість враховуваних чинників та складну їхню взаємозалежність, що визначає можливість виникнення чи не виникнення ФРП. Її межі встановлюються безпосередньо у процесі чисельного інтегрування за формулою (6). Чисельне інтегрування (варіювання приростами функцій розподілу) починають з таких значень параметрів  $C, R_n, g, U$  (мінімальних чи максимальних), які забезпечують гарантоване перебування вектора  $\vec{x}$  в області  $D_\phi$ . У процесі обчислень на кожному кроці варіювання перевіряють досягнення межі області  $D_\phi$ , тобто контролюють, виник чи не виник ферорезонанс. У разі досягнення межі області  $D_\phi$  (коли ферорезонанс перестає виникати) відновлюють початкове значення того параметра, по якому виконувалося варіювання, і на величину приросту змінюють значення суміжного параметра. Цю процедуру виконують доти, доки не будуть пройдені діапазони всіх параметрів, тобто поки не буде пройдена вся область  $D_\phi$ .

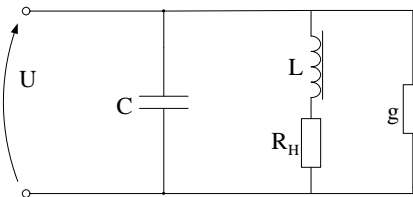


Рис. 3

Контроль факту виникнення ферорезонансу виконують шляхом розрахунків на розробленій цифровій моделі [4]. В основу обчислень покладається розрахункова схема, показана на рис. 3. Вона враховує всі названі вище основні чинники, які впливають на виникнення ферорезонансу.

Розглянута задача стосується конкретної підстанції, від якої живиться мережа 6–35 кВ. Результати її розв'язання дозволяють встановити частоту  $\omega$  пошкоджень від ферорезонансних процесів трансформаторів напруги конкретних типів та вибрати серед них такий тип ТН, для якого частота  $\omega$  найменша.

Частота відмов  $\omega$  в даному випадку є базовим показником, за яким визначаються всі інші показники надійності функціонування ТН. Для стаціонарного процесу відмов показник  $\omega$  збігається з показником інтенсивності відмов  $\lambda$ . Це дозволяє записати такі аналітичні вирази інших показників надійності:

– ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$  та ймовірність відмови  $Q(t)$  в інтервалі часу  $(0, t)$

$$P(t) = 1 - \exp(-\omega t), \quad Q(t) = \exp(-\omega t); \quad (8)$$

– функція густини розподілу часу безвідмовної роботи

$$f(t) = \omega \exp(-\omega t); \quad (9)$$

– середній час  $T_{cp}$  та дисперсія  $D(T)$  часу безвідмовної роботи

$$T_{cp} = 1/\omega, \quad D(T) = 1/\omega^2. \quad (10)$$

Подібну задачу можна розв'язати не тільки для конкретної ПС, але й для енергокомпанії в цілому, коли йдеться про заміну в ній встановлених трансформаторів напруги на ТН іншого типу або про вибір ТН з мінімальною пошкоджуваністю.

Для енергокомпанії встановлюють усереднений показник надійності  $\omega_{cp}$ , який визначає частоту пошкоджень деякої еквівалентної ПС. Його можна визначити за результатами обчис-

$$\text{лень } \omega_{\kappa} \text{ для кожної } \kappa\text{-ої реальної ПС енергокомпанії} \quad \omega_{cp} = \sum_{\kappa=1}^m \omega_{\kappa}/m, \quad (11)$$

де  $m$  – кількість підстанцій енергокомпанії;  $\omega_{\kappa}$  – частота пошкоджень трансформаторів напруги  $\kappa$ -ої ПС.

За значенням  $\omega_{cp}$  можна встановити прогнозовану кількість  $p$  пошкоджуваних ТН в енергокомпанії протягом року. Цей показник визначається як добуток  $\omega_{cp}$  на кількість  $s$  встановлених ТН

$$p = s\omega_{cp}. \quad (12)$$

Показник  $\omega_{cp}$  можна визначити також шляхом одноразового обчислення частоти  $\omega_e$  відмов ТН деякої еквівалентної ПС

$$\omega_{cp} = \omega_e = n_e q_{\phi e} = n_e \sum_{C_e \in D_{\phi e}} \Delta F(C_e) \sum_{R_n \in D_{\phi e}} \Delta F(R_n) \sum_{g \in D_{\phi e}} \Delta F(g) \sum_{U_e \in D_{\phi e}} \Delta F(U_e), \quad (13)$$

де  $n_e, q_{\phi e}$  – еквівалентна усереднена кількість однофазних замикань на землю та ймовірність відмови ТН під час одного замикання для деякої еквівалентної ПС;  $C_e, R_n, g, U_e$  – усереднені параметри еквівалентного вектора  $\vec{x}_e$ ;  $D_{\phi e}$  – область небезпечних значень усереднених параметрів.

Коефіцієнт  $n_e$  визначається як середнє значення кількості однофазних замикань на землю по всіх підстанціях енергокомпанії

$$n_e = \sum_{\kappa=1}^m n_{\kappa}/m, \quad (14)$$

де  $n_{\kappa}$  – кількість замикань на землю впродовж року для  $\kappa$ -ої реальної ПС енергокомпанії;  $m$  – кількість підстанцій енергокомпанії.

Викладені алгоритми обчислень показників надійності, що базуються на методах аналізу надійності функціонування фізичних об'єктів в умовах зовнішніх діянь, справедливі для ПС радіальних розподільних мереж, найбільш поширених у класі напруг 6–35 кВ. У менш поширених магістральних і замкнених мережах у резонанс можуть вступати ТН не одної, а двох і більше ПС одночасно, що ускладнює аналіз надійності. Проте ускладнення стосуються не алгоритмів у цілому, а тільки визначення меж області  $D_{\phi}$  небезпечних значень параметрів, внаслідок одночасного резонування декількох ТН. Фактично ускладнення стосуються розрахунків режимів, а не розрахунків надійності.

**Висновки.** Методи аналізу надійності функціонування фізичних об'єктів в умовах зовнішніх діянь придатні для аналізу надійності функціонування ТН в умовах ферорезонансних діянь. Розроблений алгоритм аналізу надійності дозволяє обчислювати всі необхідні показники надійності функціонування ТН в мережах 6–35 кВ з ізолюваною нейтраллю. Для практичної реалізації розробленого алгоритму потрібні ще певні напрацювання стосовно статистики чинників, що спричиняють ферорезонансні процеси.

1. Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по ее снижению // Светотехника и электроэнергетика. – 2003. – №1. – С. 75–81.

2. Ганус А.И., Старков К.А. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6–10 кВ на характер повреждений трансформаторов напряжения // Энергетика и электрификация. – 2006. – № 2. – С. 5–11.

3. Кириленко О.В., Кінаш Б.М., Гудим В.І. Аналіз надійності функціонування електроенергетичних об'єктів. – К., 2008. – 224 с.

4. Равлик О., Гречин Т., Іванюк В. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. – 1997. – №340. – С. 96–101.

Надійшла 24.02.2010