

# Енергетика, контроль та діагностика об'єктів нафтогазового комплексу

УДК 621.316.925

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ЗАХИСТУ ВІД ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ ОБМОТКИ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, ЩО ПРАЦЮЄ В БЛОЦІ З ТРАНСФОРМАТОРОМ

В. М. Кутін, О. О. Шпачук

Вінницький національний технічний університет; м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, тел. 097 8286253, e-mail: shpachuk2@gmail.com

Запропоновано пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який розраховує та реагує на струм в місці виникнення замикання на землю, шляхом використання методу накладання постійного струму на коло, що містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі, використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора відносно землі.

Ключові слова: синхронний генератор, однофазне замикання на землю, релейний захист.

Предложено устройство защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, который рассчитывает и реагирует на ток в месте возникновения замыкания на землю, путем использования метода наложения постоянного тока на круг, содержащий изоляцию обмотки статора для определения активного сопротивления изоляции обмотки статора относительно земли, использования энергии разряда предварительно заряженного конденсатора для определения переходного сопротивления в месте замыкания на землю, контроля напряжения нулевой последовательности и учета емкости изоляции обмотки статора относительно земли.

Ключевые слова: синхронный генератор, однофазное замыкание на землю, релейная защита.

A protection device against a single phase ground fault of the alternator's stator frame working in a unit with a transformer is proposed. This device estimates and responds to the voltage in the area of emerging the ground fault by means of applying the method of imposing the direct current on the circle that has a stator frame insulation for defining its effective resistance relative to ground. It is also carried out by using the discharge energy of the live capacitor for defining the transition resistance in the ground fault, and for voltage control of zero sequence and for volume record of the stator frame insulation relative to ground.

Keywords: alternator, single phase ground fault, relay protection.

### Вступ

Чимало пошкоджень генератора спричинені порушенням ізоляції обмоток статора і ротора. Ці порушення зазвичай відбуваються внаслідок старіння ізоляції, її зволоження, наявності в ній дефектів, а також в результаті підвищення напруги, механічних пошкоджень, наприклад через вібрації стрижнів обмоток і сталі магнітопроводу. Отже, пошкодження можливі в будь-якій частині обмоток.

Найбільш поширеним видом пошкодження в синхронних генераторах є однофазні зами-

кання на землю. Вони складають близько 60 ÷ 80 % від усіх видів пошкоджень. Однофазні замикання на землю становлять значну небезпеку для синхронних генераторів, оскільки в місці замикання зазвичай горить дуга, що спалює сталь магнітопроводу статора. Пошкодження сталі потребує довготривалого та складного ремонту. До того ж в процесі протікання однофазного замикання на землю створюються умови для подальшого розвитку пошкодження в міжфазні (дво- та трифазні) короткі замикання.

**Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій**

На електричних станціях України використовуються термінали релейного захисту та автоматики різних виробників, як закордонних, так і вітчизняних. Провідними постачальниками такого роду обладнання на ЕС України є ряд закордонних компаній, таких як АВВ, General Electric, ІЦ Бреслер.

Компанія АВВ для захисту генераторів, що працюють в блоці з трансформатором, пропонує використовувати пристрої REM 543, REM 545, REG 615 та REG 630. Вони, окрім повного комплексу захисту та самодіагностування пристрою, містять ще й блок вимірювання, що полегшує контроль за режимом роботи генератора.

Компанія General Electric для захисту синхронних генераторів пропонує використовувати термінали захисту G30, G60, G650, 489 Generator Protection System та 889 Generator Protection System. Запропоновані термінали реалізують захисти від усіх видів пошкодження і містять диференційні захисти статора синхронного генератора, захист від втрати збудження, захист від замикань в колі збудження, дистанційний захист, захист від незбалансованого навантаження та ряд інших.

Варто звернути увагу на продукцію компанії Бреслер, а особливо на комплекс захистів генератора Бреслер ШГ 2114. Згаданий захистний комплекс може використовуватися на генераторах потужністю до 1200 МВт і містить захисти від усіх видів пошкоджень та аномальних режимів роботи синхронних генераторів. Крім того, комплекс містить комплекти захисту блочного трансформатора та трансформатора власних потреб ЕС. Ще однією особливістю захисного комплексу є висока надійність апаратної частини терміналу, яка забезпечується завдяки розвиненій системі самодіагностування та дублюванню головних апаратних кіл [1-5].

**Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми**

Основним недоліком усіх сучасних типів захистів від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, який працює в блоці з трансформатором, є те, що вони не контролюють значення струму замикання на землю, а в основу спрацювання захисту покладений контроль параметрів, що опосередковано характеризують аварійний режим роботи машини, наприклад, контроль напруги нульової послідовності першої гармоніки і напруги третьої гармоніки, або контроль накладеного на коло статора постійного чи змінного струму. До недоліків існуючих захистів також можна віднести нечутливість до виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора поблизу нейтралі, малу чутливість захистів при симетричному зниженні параметрів ізоляції обмотки статора. Зазначені вище недоліки можуть призводити до хибних спрацювань захисту [6-8].

**Цілі статті**

Метою дослідження є підвищення надійності спрацювання і чутливості захисту від однофазних замикань на землю шляхом використання комбінованого методу накладання сигналу постійного струму, використання енергії попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та періодичного вимірювання ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора.

**Результати дослідження**

Для підвищення швидкодії та чутливості захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, пропонуємо використовувати метод, який розраховує та реагує на проходження струму в місці виникнення замикання на землю, шляхом використання комбінованого принципу накладання постійного струму на коло, що містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролю напруги нульової послідовності для визначення наявності аварійного режиму та врахування ємності ізоляції обмотки статора відносно землі.

Отримане значення струму однофазного замикання на землю (ОЗЗ) порівнюється з уставкою. У разі перевищення уставки захист подає команду на вимикання синхронного генератора від мережі, на сигнал і автомат гасіння поля. Структурна схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СТ, що працює в блоці з трансформатором, представлена на рисунку 1.

Структурна схема пристрою, який реалізовує запропонований спосіб, містить джерело випрямленої напруги 1, яке через резистор 2 підключене паралельно конденсатора 3, а через резистор 4 – до ємнісного фільтра 5, який під'єднаний паралельно до розрядника 6, підключеного між нульовою точкою зірки первинної обмотки трансформатора напруги 7 і землею. Трансформатор напруги 7 підключений до мережі між силовим трансформатором 8 і обмоткою статора 9 синхронного генератора через вимикач 10 реагуючого органу 11, перший вхід якого підключено паралельно до резистора 4, другий – до вторинної обмотки трансформатора напруги 7, включеної в «розімкнутий трикутник», третій – паралельно до резистора 2. Реагуючий орган 11 містить блок живлення 12, вихід якого через стабілізатор напруги 13 підключений до перших входів генератора тактових імпульсів 14, аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) 15, 16, 17, мікроконтролера (МК) 18, підсилювачів сигналу 19 та 20. Вихід генератора тактових імпульсів 14 сполучено з другими входами АЦП 15, 16, 17 та МК 18. Підсилювачі сигналу 19, 20 другими входами підключені паралельно до резисторів 2 і 4 від-

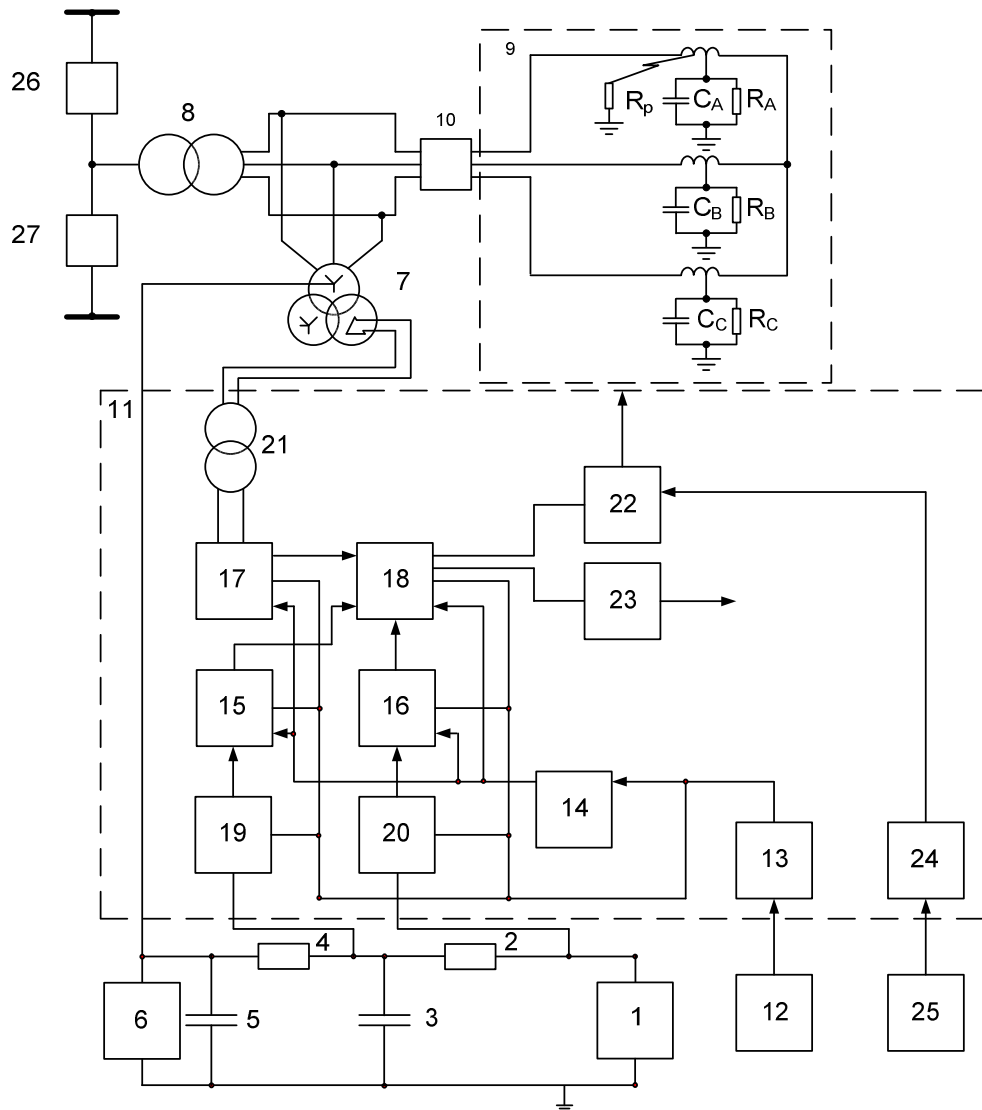


Рисунок 1 – Структурна схема реалізації методу захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора

повідно. Вихід підсилювача сигналу 19 під'єднаний до третього входу АЦП 15, а вихід підсилювача сигналу 20 – до третього входу АЦП 16, вихід АЦП 15 підключено до третього входу МК 18, а вихід АЦП 16 – до четвертого входу МК 18. Третій вхід АЦП 17 підключено через трансформатор 21 до виходу обмотки, включеної за схемою «розімкнений трикутник» трансформатора напруги 7, а вихід АЦП 17 підключений до п'ятого входу МК 18, перший вихід якого підключений до першого входу електронного ключа 22, а другий вихід – до входу сигнального реле 23. Причому до другого входу електронного ключа 22 підключений вихід стабілізатора напруги 24, вхід якого з'єднаний з виходом джерела живлення 25. Вихід електронного ключа 22 з'єднаний з колами керування високовольними вимикачами 26 і 27, через які блочний трансформатор 8 і генератор сполучені з мережею.

За відсутності пошкодження ізоляції сигнал від джерела випрямленої напруги 1 (рисунок 1) накладається на коло, утворене резисторами 2

та 4, опором первинної обмотки трансформатора напруги 7 і ізоляцією фаз обмотки статора 9 синхронного генератора відносно землі. Величина струму, що протікає через резистори 2 та 4, буде однаковою і може бути визначена за формулою

$$i_2 = i_4 = \frac{U}{R_2 + R_4 + R_T + R_\Sigma}, \quad (1)$$

де  $U$  – напруга живлення;  
 $R_2$  – опір резистора 2;  
 $R_4$  – опір резистора 4;  
 $R_T$  – опір первинної обмотки трансформатора напруги 7;  
 $R_\Sigma$  – загальний опір ізоляції обмотки статора відносно землі.

Напруга  $U_C$  на конденсаторі 3 (рисунок 1) буде залежати від активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі і визначатиметься за виразом

$$U_C = U - \frac{UR_2}{R_2 + R_4 + R_T + R_\Sigma}. \quad (2)$$

МК 18 починає процедуру первинних вимірювань і подає команду на АЦП 15-17 для початку перетворення сигналів контрольованих параметрів. Після зчитування інформації з АЦП 15-17 відбувається перетворення цифрових сигналів у значення контрольованих параметрів за співвідношеннями (11, 12, 13), які подано нижче. Після завершення перетворень процедура первинних вимірювань завершується, і починається основний цикл програми. На АЦП знову подається сигнал для початку перетворення, і алгоритм дій при вимірюваннях повторюється. При виникненні замикання в обмотці статора через перехідний опір  $R_p$  напруга на конденсаторі 3 залишиться незмінною, а на струм, що тече через резистор 4, додатково накладеться струм розряду конденсатора 3, максимальне значення якого буде зворотньопропорційне значенню перехідного опору в місці замикання на землю. Сигнали струмів, що протікають через резистори 2 (струм пропорційний загальному опорю ізоляції обмотки статора відносно землі  $R_\Sigma$ ) та 4 (струм обернено пропорційний перехідному опорю в місці замикання на землю  $R_p$ ), надходять на підсилювачі сигналу 20 та 19, а після підсилення - на входи АЦП 16 та 15 відповідно, і перетворюються в цифрову форму. Сигнал напруги нульової послідовності надходить через трансформатор 21 до АЦП 17 і перетворюється в цифрову форму. Сигнали про загальний опір ізоляції обмотки статора відносно землі  $R_\Sigma$ , перехідний опір в місці замикання на землю  $R_p$  та напругу нульової послідовності  $U_0$  в цифровій формі надходять до МК 18 для подальшої обробки за співвідношеннями:

$$U_0 = U_s k_T, \quad (3)$$

де  $U_0$  – напруга нульової послідовності;  
 $U_s$  – сигнал напруги нульової послідовності, що надходить від АЦП 17 до АЦП 18;  
 $k_T$  – результуючий коефіцієнт трансформації, що враховує коефіцієнт трансформації трансформатора напруги та проміжного трансформатора 21,

$$R_\Sigma(I_1) = \frac{U}{I_1} - R_2 - R_4 - R_T, \quad (4)$$

де  $I_1$  – сигнал постійного струму, що надходить від підсилювача 20 до АЦП 16 та до МК 18,

$$R_p(I_2) = \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2}, \quad (5)$$

де  $I_2$  – сигнал постійного струму, що надходить від підсилювача 19 до АЦП 15 та до мікроконтролера 18;

$s, f, g, h$  – коефіцієнти, що обумовлюються параметрами обмежувачів резисторів, а також активним та індуктивним опором первинної обмотки трансформатора напруги типу НТМИ.

Після отримання значень  $R_\Sigma, R_p$  та  $U_0$  відбувається виконання логічної частини роботи захисту. У випадку зниження рівня опорю ізоляції нижче встановленого рівня обслуговуючому персоналу подається сигнал від МК 18 через сигнальне реле 23. В іншому випадку, визначається наявність аварійного режиму (наявність кидка струму на резистори 4 порівняно з

даними первинних вимірювань і зростання напруги нульової послідовності в порівнянні з даними первинних вимірювань) та розрахунок значення струму однофазного замикання на землю обмотки статора за співвідношенням (6).

$$I = 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2} (\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}. \quad (6)$$

У випадку, якщо розраховане значення струму однофазного замикання на землю обмотки статора 9 перевищує уставку спрацювання, сигнал подається з МК 18 на електронний ключ 22 для відключення генератора від мережі за допомогою високовольтних вимикачів 26 та 27. Якщо аварійного режиму роботи генератора не виявлено, МК 18 подає команду АЦП 15-17 для початку перетворення нової вибірки сигналів [9-11].

Загальноприйняті умови спрацювання захистів від ОЗЗ обмотки статора СГ становлять 5А - для генераторів потужністю до 160 МВт та 2 А - для генераторів потужністю 300 МВт і більше. Але зазначені рівні струмів ОЗЗ виникають на пізніх етапах розвитку пошкодження ізоляції при перехідному опорю в місці замикання – від  $10^2$  до  $(3,5 \div 4) \cdot 10^3$  Ом. В свою чергу, при виникненні пошкодження з високим перехідним опором (100 кОм) струм ОЗЗ становить  $(1 \div 4) \cdot 10^{-3}$  А. Для забезпечення чутливості захистів від ОЗЗ зазвичай використовують перевірку за коефіцієнтом чутливості

$$K = \frac{I_{OZZ \min}}{I_{SZOZZ}} \geq 1,5, \quad (7)$$

де  $I_{OZZ \min}$  – мінімальне значення струму ОЗЗ,  $I_{SZOZZ}$  – значення струму спрацювання захисту від ОЗЗ. Для забезпечення відповідного рівня чутливості запропонованого захисту при виникненні пошкоджень зі значним перехідним опором пропонується прийняти струм спрацювання захисту за результатами, що зведені у таблиці 1.

Якість процедури контролю характеризується вірогідністю контролю. Кількісною оцінкою вірогідності є ймовірність того, що результат контролю відповідає дійсному стану об'єкта.

Об'єкт (обмотка статора СГ), може перебувати в одному з можливих станів – справному С або несправному  $\bar{C}$ . Ймовірність знаходження в справному Р (С) або несправному  $P(\bar{C})$  стані визначається щільністю розподілу можливих значень контрольованої величини  $f(x)$  та граничними значеннями допускового інтервалу  $X_H$  і  $X_B$ .

$$P(C) = \int_{X_H}^{X_B} f(x) dx, \quad (8)$$

$$P(\bar{C}) = \int_{-\infty}^{X_H} f(x) dx + \int_{X_B}^{+\infty} f(x) dx, \quad (9)$$

При контролі може виникнути одна з чотирьох подій, дві з яких відповідають дійсному стану об'єкта, а дві інші є помилковими. Вна-

Таблиця 1 – Середні показники діючих значень вимушеної складової струму ОЗЗ обмотки статора різних типів турбо- та гідрогенераторів, що працюють в блоці з трансформатором, і струм спрацювання захисту при перехідному опорі в місці замикання на землю 100 кОм з врахуванням коефіцієнта чутливості 1,5

| R <sub>p</sub> , кОм         | Тип генератора          |                          |                          |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                              | Гідрогенератори         | Турбогенератори <160 МВт | Турбогенератори >300 МВт |
|                              | I <sub>ОЗЗ</sub> , А    |                          |                          |
| 100                          | 0,001                   | 0,003                    | 0,004                    |
| 50                           | 0,004                   | 0,011                    | 0,016                    |
| 30                           | 0,011                   | 0,031                    | 0,046                    |
| 10                           | 0,105                   | 0,27                     | 0,419                    |
| 5                            | 0,43                    | 0,8                      | 1,44                     |
| 2                            | 2,36                    | 2,033                    | 4,167                    |
| 1                            | 5,96                    | 2,778                    | 6,142                    |
| 0,1                          | 15,7                    | 3,853                    | 9,148                    |
| Струм спрацювання захисту, А | 6,67 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002                    | 0,0027                   |

слідок цього зменшується ймовірність вірного прийняття відповідного рішення

$$P_B(\Pi) = P(C) - P_L; P_B(\bar{\Pi}) = P(\bar{C}) - P_H. \quad (10)$$

Як витікає з проведеного аналізу, рішення «придатний» П формується як сума двох складних подій (С,П) і (C̄, П), а тому вірогідність отриманого результату «придатний» D(П) може бути оцінена як відношення ймовірності вірно прийнятого рішення П і ймовірність прийняття рішення П за результатами контролю.

Для аналізу хибної P<sub>x</sub> відмови треба розглядати усі елементи об'єкта, значення параметрів яких лежить в інтервалі x<sub>H</sub> ÷ x<sub>B</sub>, а для невизначеної відмови P<sub>H</sub> – усі елементи об'єкта з параметрами поза границями допускового інтервалу. Тоді ймовірність помилкових рішень буде визначатися ймовірністю знаходження контрольованого параметра у вищезгаданих областях і ймовірністю того, що вплив похибки вимірювання призведе до того, що результат потрапляє в області, де приймаються рішення про стан об'єкта, яке не відповідає істині.

Ймовірність хибної відмови, її виникнення при x<sub>H</sub> < x < x<sub>B</sub> буде мати дві складові – ймовірність того, що результат буде меншим x<sub>H</sub> та ймовірність того, що результат буде більшим x<sub>B</sub>. Для усіх можливих значень x, які знаходяться в інтервалі x<sub>H</sub> ÷ x<sub>B</sub>, треба враховувати ймовірність їх знаходження в цьому інтервалі. Таким чином, отримаємо

$$P_x = \int_{x_H}^{x_B} f(x) \int_{-\infty}^{x_H-x} f_1\left(\frac{o}{y}\right) d^o y dx + \int_{x_H}^{x_B} f(x) \int_{x_B-x}^{+\infty} f_1\left(\frac{o}{y}\right) d^o y dx. \quad (11)$$

При багатопараметричному контролі об'єкта під ймовірністю хибної відмови розуміють ймовірність того, що всі n параметрів об'єкта знаходяться в допуску (об'єкт справний) і хоча б один параметр за результатами

контролю був визнаний не вірно. Ймовірністю невизначеної відмови в цьому випадку є ймовірність того, що серед n параметрів має місце хоча б один не в допуску (об'єкт є несправним), за результатами контролю об'єкт був визнаний придатним. Виходячи з цього, можна записати, що

$$P_x = P(C) - P_B(\Pi), \quad (12)$$

де  $P(C) = \prod_{i=1}^n P(C_i)$  - ймовірність того, що всі параметри об'єкта знаходяться в допуску;  $P_B(\Pi_i) = P(C_i) - P_{Xi}$ .

Тоді

$$P_x = \prod_{i=1}^n P(C_i) - \prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi}). \quad (13)$$

Для ймовірності невизначеної відмови будемо виходити з виразу:

$$P_H = P(\Pi) - P_B(\Pi). \quad (14)$$

Невизначена відмова буде виникати, коли похибка вимірювання буде приймати значення більші, ніж x<sub>H</sub>-x, або менші, ніж x<sub>B</sub>-x (враховуючи знак похибки). Виходячи з закону розподілу можливих значень контрольованої величини, можна визначити ймовірність знаходження параметра «лівіше» x<sub>H</sub>, або «правіше» x<sub>B</sub>. Тоді, з врахуванням наведеного вище, ймовірність виникнення невизначеної відмови буде описана виразом

$$P_H = \int_{-\infty}^{x_H} f(x) \int_{x_H-x}^{x_B-x} f_1\left(\frac{o}{y}\right) d^o y dx + \int_{x_B}^{+\infty} f(x) \int_{x_B-x}^{x_H-x} f_1\left(\frac{o}{y}\right) d^o y dx. \quad (15)$$

Підставивши значення P(Π) і P<sub>B</sub>(Π), отримаємо:

$$P_H = \prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi} + -P_{Hi}) - \prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi}). \quad (16)$$

Виходячи з виразів для абсолютних показників багатопараметричного контролю, можна отримати вираз для вірогідності результату «придатний»  $D(\Pi)$  [12].

$$D(\Pi) = \frac{\prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi})}{\prod_{i=1}^n (P(C_i) - P_{Xi} - P_{Hi})} \quad (17)$$

Порівняємо вірогідності контролю для основних методів захисту СГ, що працюють в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю, виконавши відповідні розрахунки.

Вірогідність контролю методу захисту СГ, що працює в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на контролі напруги нульової послідовності, накладання постійного струму та використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора і врахування ємності ізоляції відносно землі, визначимо, виконавши розрахунки відповідно до співвідношень (18–27).

Імовірність того, що стан об'єкта буде класифікується як справний за таким параметром, як загальний опір ізоляції обмотки статора відносно землі, становитиме:

$$P(C_{R_\Sigma}) = \quad (18)$$

$$= \int_{R_{\Sigma \min}}^{R_{\Sigma \max}} 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2(\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}} dR_\Sigma$$

де  $R_\Sigma$  – загальний активний опір ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі;

$C_\Sigma$  – загальна ємність ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі;

$R_p$  – перехідний опір в місці однофазного замикання на землю;

$U_0$  – діюче значення напруги нульової послідовності.

Імовірність того, що стан об'єкта буде класифікуватися як справний за таким параметром, як перехідний опір в місці замикання на землю, становитиме

$$P(C_{R_p}) = \quad (19)$$

$$= \int_{R_{p \min}}^{R_{p \max}} 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2(\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}} dR_p$$

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за таким параметром, як напруга нульової послідовності:

$$P(C_{U_0}) = \quad (20)$$

$$= \int_{U_{0 \min}}^{U_{0 \max}} 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2(\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}} dU_0$$

Імовірність хибної відмови за параметром «напруга нульової послідовності» визначається за виразом:

$$P_{XU_S} = \int_{U_{S \min}}^{U_{S \max}} U_S k_T \int_{-\infty}^{+\Delta U_S} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta U_S}{2\sigma^2}} d\Delta U_S dU_S + \int_{U_{S \min}}^{U_{S \max}} U_S k_T \int_{\Delta U_S}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta U_S}{2\sigma^2}} d\Delta U_S dU_S, \quad (21)$$

де  $\Delta U_S$  – похибка вимірювання сигналу напруги нульової послідовності;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення розподілу.

Імовірність хибної відмови за параметром «опір ізоляції обмотки статора генератора відносно землі» визначається за виразом

$$P_{XR_\Sigma} = \int_{I_{1 \min}}^{I_{1 \max}} \left( \frac{U}{I_1} - R_2 - R_4 - R_T \right) \int_{-\infty}^{+\Delta I_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_1}{2\sigma^2}} d\Delta I_1 dI_1 + \int_{I_{1 \min}}^{I_{1 \max}} \left( \frac{U}{I_1} - R_2 - R_4 - R_T \right) \int_{\Delta I_1}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_1}{2\sigma^2}} d\Delta I_1 dI_1, \quad (22)$$

де  $\Delta I_1$  – похибка вимірювання сигналу струму, що накладається на статорну обмотку.

Імовірність хибної відмови за параметром перехідного опору в місці замикання на землю визначається за виразом:

$$P_{XR_p} = \int_{I_{2 \min}}^{I_{2 \max}} \left( \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2} \right) \int_{-\infty}^{+\Delta I_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_2}{2\sigma^2}} d\Delta I_2 dI_2 + \int_{I_{2 \min}}^{I_{2 \max}} \left( \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2} \right) \int_{\Delta I_2}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_2}{2\sigma^2}} d\Delta I_2 dI_2, \quad (23)$$

де  $\Delta I_2$  – похибка вимірювання сигналу струму, що накладається на статорну обмотку.

Імовірність невизначеної відмови за параметром «напруга нульової послідовності» визначається за виразом:

$$P_{HU_S} = \int_{-\infty}^{U_{S \min}} U_S k_T \int_{-\Delta U_S}^{+\Delta U_S} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta U_S}{2\sigma^2}} d\Delta U_S dU_S + \int_{U_{S \max}}^{+\infty} U_S k_T \int_{-\Delta U_S}^{+\Delta U_S} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta U_S}{2\sigma^2}} d\Delta U_S dU_S. \quad (24)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром опору ізоляції обмотки статора генератора відносно землі визначається за виразом:

$$P_{HR_\Sigma} = \int_{-\infty}^{I_{1 \min}} \left( \frac{U}{I_1} - R_1 - R_3 - R_T \right) \int_{-\Delta I_1}^{+\Delta I_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_1}{2\sigma^2}} d\Delta I_1 dI_1 + \int_{I_{1 \max}}^{+\infty} \left( \frac{U}{I_1} - R_1 - R_3 - R_T \right) \int_{-\Delta I_1}^{+\Delta I_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_1}{2\sigma^2}} d\Delta I_1 dI_1. \quad (25)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром перехідного опору в місці замикання на землю визначається за виразом:

$$P_{HR_p} = \int_{-\infty}^{I_{2 \min}} \left( \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2} \right) \int_{-\Delta I_2}^{+\Delta I_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_2}{2\sigma^2}} d\Delta I_2 dI_2 + \int_{I_{2 \max}}^{+\infty} \left( \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2} \right) \int_{-\Delta I_2}^{+\Delta I_2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta I_2}{2\sigma^2}} d\Delta I_2 dI_2. \quad (26)$$

Для того випадку, захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, представлені вище вирази набудуть такого вигляду:

$$D(\Pi) = (P(C_{R_{\Sigma}}) - P_{XR_{\Sigma}})(P(C_{R_p}) - P_{XR_p}) \times (P(C_{R_p}) - P_{XR_p}) \times \left\{ (P(C_{R_{\Sigma}}) - P_{XR_{\Sigma}} - P_{HR_{\Sigma}}) \times (P(C_{R_p}) - P_{XR_p} - P_{HR_p}) \right\}^{-1} \quad (27)$$

Для визначення імовірності контролю методу захисту СГ, що працює в блоці з трансформатором від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на контролі 1-ої гармоніки напруги нульової послідовності та 3-ої гармоніки напруги, виконаємо розрахунки відповідно до співвідношень (29–35) аналогічно проведеним раніше розрахункам. Напруга спрацювання захисту від ОЗЗ визначається за виразом (28) [13]

$$U_{SZ} = k_{ots} \sqrt{U_0^2 + (k_f U_{03})^2}, \quad (28)$$

де  $U_0$  – напруга 1-ої гармоніки нульової послідовності;

$U_{03}$  – напруга 3-ої гармоніки нульової послідовності;

$k_{ots}$  – коефіцієнт, що враховує перехідні процеси, що виникають при зовнішніх коротких замиканнях ( $k_{ots} > 1$ );

$k_f$  – коефіцієнт, що враховує неідеальну роботу фільтра ( $k_f < 1$ ).

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за таким параметром, як напруга першої гармоніки нульової послідовності, визначається за виразом

$$P_{C_{U_0}} = \int_{U_{0min}}^{U_{0max}} k_{ots} \sqrt{U_0^2 + (k_f U_{03})^2} dU_0. \quad (29)$$

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за таким параметром, як напруга третьої гармоніки нульової послідовності, визначається за виразом

$$P_{C_{U_{03}}} = \int_{U_{03min}}^{U_{03max}} k_{ots} \sqrt{U_0^2 + (k_f U_{03})^2} dU_{03}. \quad (30)$$

Імовірність хибної відмови за параметром напруги першої гармоніки нульової послідовності визначається за виразом

$$P_{X_{U_0}} = \int_{U_{0min}}^{U_{0max}} U_0 \int_{-\infty}^{-\Delta U_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_0}{2\sigma^2}} d\Delta U_0 dU_0 + \int_{U_{0min}}^{U_{0max}} U_0 \int_{\Delta U_0}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_0}{2\sigma^2}} d\Delta U_0 dU_0, \quad (31)$$

де  $\Delta U_0$  – похибка вимірювання напруги нульової послідовності.

Імовірність хибної відмови за параметром напруги третьої гармоніки нульової послідовності визначається за виразом

$$P_{X_{U_{03}}} = \int_{U_{03min}}^{U_{03max}} U_{03} \int_{-\infty}^{-\Delta U_{03}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_{03}}{2\sigma^2}} d\Delta U_{03} dU_{03} + \int_{U_{03min}}^{U_{03max}} U_{03} \int_{\Delta U_{03}}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_{03}}{2\sigma^2}} d\Delta U_{03} dU_{03}, \quad (32)$$

де  $\Delta U_{03}$  – похибка вимірювання напруги нульової послідовності.

Імовірність невизначеної відмови за параметром напруги першої гармоніки нульової послідовності визначається за виразом

$$P_{H_{U_0}} = \int_{-\infty}^{U_{0min}} U_0 \int_{-\Delta U_0}^{\Delta U_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_0}{2\sigma^2}} d\Delta U_0 dU_0 + \int_{U_{0min}}^{+\infty} U_0 \int_{-\Delta U_0}^{\Delta U_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_0}{2\sigma^2}} d\Delta U_0 dU_0. \quad (33)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром напруги третьої гармоніки нульової послідовності визначається за виразом

$$P_{H_{U_{03}}} = \int_{-\infty}^{U_{03min}} U_{03} \int_{-\Delta U_{03}}^{\Delta U_{03}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_{03}}{2\sigma^2}} d\Delta U_{03} dU_{03} + \int_{U_{03min}}^{+\infty} U_{03} \int_{-\Delta U_{03}}^{\Delta U_{03}} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_{03}}{2\sigma^2}} d\Delta U_{03} dU_{03}. \quad (34)$$

Вірогідність контролю для методу, що ґрунтується на контролі 1-ої гармоніки напруги нульової послідовності та 3-ої гармоніки напруги нульової послідовності, можна розрахувати за таким виразом:

$$D = \frac{(P_{C_{U_0}} - P_{X_{U_0}})(P_{C_{U_{03}}} - P_{X_{U_{03}}})}{(P_{C_{U_0}} - P_{X_{U_0}} - P_{H_{U_0}})(P_{C_{U_{03}}} - P_{X_{U_{03}}} - P_{H_{U_{03}}})}. \quad (35)$$

Для визначення вірогідності контролю методу захисту СГ, що працює в блоці з трансформатором від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на накладанні постійного струму, виконаємо розрахунки за співвідношенням (37–43). Опір в колі накладання відносно землі визначається за виразом (36).

$$R_{ust} = \frac{U}{I}, \quad (36)$$

де  $I$  – струм, що накладається на статорну обмотку;

$U$  – напруга, що прикладається до статорної обмотки.

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за таким параметром, як напруга, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{C_U} = \int_{U_{min}}^{U_{max}} \frac{U}{I} dU. \quad (37)$$

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за таким параметром, як струм, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{C_I} = \int_{I_{min}}^{I_{max}} \frac{U}{I} dI. \quad (38)$$

Імовірність хибної відмови за параметром напруги, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{X_U} = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} U \int_{-\infty}^{-\Delta U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U}{2\sigma^2}} d\Delta U dU + \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} U \int_{\Delta U}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U}{2\sigma^2}} d\Delta U dU, \quad (39)$$

де  $\Delta U$  – похибка вимірювання напруги, що прикладається до статорної обмотки.

Імовірність хибної відмови за параметром струму, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{X_I} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} I \int_{-\infty}^{-\Delta I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I}{2\sigma^2}} d\Delta I dI + \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} I \int_{\Delta I}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I}{2\sigma^2}} d\Delta I dI, \quad (40)$$

де  $\Delta I$  – похибка вимірювання струму, що накладається на статорну обмотку.

Імовірність невизначеної відмови за напругою, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{H_U} = \int_{-\infty}^{U_{\min}} U \int_{-\Delta U}^{+\Delta U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U}{2\sigma^2}} d\Delta U dU + \int_{U_{\max}}^{+\infty} U \int_{-\Delta U}^{+\Delta U} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U}{2\sigma^2}} d\Delta U dU. \quad (41)$$

Імовірність невизначеної відмови за струмом, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{H_I} = \int_{-\infty}^{I_{\min}} I \int_{-\Delta I}^{+\Delta I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I}{2\sigma^2}} d\Delta I dI + \int_{I_{\max}}^{+\infty} I \int_{-\Delta I}^{+\Delta I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I}{2\sigma^2}} d\Delta I dI. \quad (42)$$

Вірогідність контролю для методу, що ґрунтується на накладанні на обмотку статора постійного струму, можна розрахувати за таким виразом:

$$D = \frac{(P_{C_U} - P_{X_U})(P_{C_I} - P_{X_I})}{(P_{C_U} - P_{X_U} - P_{H_U})(P_{C_I} - P_{X_I} - P_{H_I})}. \quad (43)$$

Для визначення імовірності контролю методу захисту СГ, що працює в блоці з трансформатором від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на накладанні змінного струму, виконаємо розрахунки згідно співвідношень (45-57). Повний опір в колі накладання відносно землі визначається за виразом (44) [14]

$$R_g = \frac{k_U}{k_I} \cdot \frac{U_X^2 + U_Y^2}{U_X I_X + U_Y I_Y}, \quad (44)$$

де  $U_X$  – активна складова напруги, що прикладається до статорної обмотки;

$U_Y$  – реактивна складова напруги, що прикладається до статорної обмотки;

$I_X$  – активна складова струму, що накладається на статорну обмотку;

$I_Y$  – активна складова струму, що накладається на статорну обмотку;

$k_U$  – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги;

$k_I$  – коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за параметром «активна складова напруги, що прикладається до статорної обмотки», визначається за виразом

$$P_{C_{U_X}} = \int_{U_{X \min}}^{U_{X \max}} \frac{k_U}{k_I} \cdot \frac{U_X^2 + U_Y^2}{U_X I_X + U_Y I_Y} dU_X. \quad (45)$$

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за параметром «реактивна складова напруги, що прикладається до статорної обмотки», визначається за виразом

$$P_{C_{U_Y}} = \int_{U_{Y \min}}^{U_{Y \max}} \frac{k_U}{k_I} \cdot \frac{U_X^2 + U_Y^2}{U_X I_X + U_Y I_Y} dU_Y. \quad (46)$$

Імовірність того, що стан об'єкта буде класифікуватиметься як справний за параметром «активна складова струму, що накладається на статорну обмотку», визначається за виразом

$$P_{C_{I_X}} = \int_{I_{X \min}}^{I_{X \max}} \frac{k_U}{k_I} \cdot \frac{U_X^2 + U_Y^2}{U_X I_X + U_Y I_Y} dI_X. \quad (47)$$

Імовірність того, що стан об'єкта класифікуватиметься як справний за параметром «реактивна складова струму, що накладається на статорну обмотку», визначається за виразом

$$P_{C_{I_Y}} = \int_{I_{Y \min}}^{I_{Y \max}} \frac{k_U}{k_I} \cdot \frac{U_X^2 + U_Y^2}{U_X I_X + U_Y I_Y} dI_Y. \quad (48)$$

Імовірність хибної відмови за параметром активної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{X_{U_X}} = \int_{U_{X \min}}^{U_{X \max}} U_X \int_{-\infty}^{-\Delta U_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_X}{2\sigma^2}} d\Delta U_X dU_X + \int_{U_{X \min}}^{U_{X \max}} U_X \int_{\Delta U_X}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_X}{2\sigma^2}} d\Delta U_X dU_X, \quad (49)$$

де  $\Delta U_X$  – похибка вимірювання активної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки.

Імовірність хибної відмови за параметром реактивної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{X_{U_Y}} = \int_{U_{Y \min}}^{U_{Y \max}} U_Y \int_{-\infty}^{-\Delta U_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_Y}{2\sigma^2}} d\Delta U_Y dU_Y + \int_{U_{Y \min}}^{U_{Y \max}} U_Y \int_{\Delta U_Y}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_Y}{2\sigma^2}} d\Delta U_Y dU_Y, \quad (50)$$

де  $\Delta U_Y$  – похибка вимірювання реактивної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки.



Імовірність хибної відмови за параметром активної складової струму, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{X_{I_X}} = \int_{I_{X_{\min}}}^{I_{X_{\max}}} I_X \int_{-\infty}^{+\Delta I_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_X}{2\sigma^2}} d\Delta I_X dI_X + \int_{I_{X_{\min}}}^{I_{X_{\max}}} I_X \int_{\Delta I_X}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_X}{2\sigma^2}} d\Delta I_X dI_X, \quad (51)$$

де  $\Delta I_X$  – похибка вимірювання активної складової струму, що накладається на статорну обмотку.

Імовірність хибної відмови за параметром реактивної складової струму, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{X_{I_Y}} = \int_{I_{Y_{\min}}}^{I_{Y_{\max}}} I_Y \int_{-\infty}^{+\Delta I_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_Y}{2\sigma^2}} d\Delta I_Y dI_Y + \int_{I_{Y_{\min}}}^{I_{Y_{\max}}} I_Y \int_{\Delta I_Y}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_Y}{2\sigma^2}} d\Delta I_Y dI_Y, \quad (52)$$

де  $\Delta I_Y$  – похибка вимірювання реактивної складової струму, що накладається на статорну обмотку.

Імовірність невизначеної відмови за параметром активної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{H_{U_X}} = \int_{-\infty}^{U_X} U_X \int_{-\Delta U_X}^{+\Delta U_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_X}{2\sigma^2}} d\Delta U_X dU_X + \int_{U_X}^{+\infty} U_X \int_{-\Delta U_X}^{+\Delta U_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_X}{2\sigma^2}} d\Delta U_X dU_X. \quad (53)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром реактивної складової напруги, що прикладається до статорної обмотки, визначається за виразом

$$P_{H_{U_Y}} = \int_{-\infty}^{U_Y} U_Y \int_{-\Delta U_Y}^{+\Delta U_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_Y}{2\sigma^2}} d\Delta U_Y dU_Y + \int_{U_Y}^{+\infty} U_Y \int_{-\Delta U_Y}^{+\Delta U_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta U_Y}{2\sigma^2}} d\Delta U_Y dU_Y. \quad (54)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром активної складової струму, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{H_{I_X}} = \int_{-\infty}^{I_{X_{\min}}} I_X \int_{-\Delta I_X}^{+\Delta I_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_X}{2\sigma^2}} d\Delta I_X dI_X + \int_{I_{X_{\max}}}^{+\infty} I_X \int_{-\Delta I_X}^{+\Delta I_X} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_X}{2\sigma^2}} d\Delta I_X dI_X. \quad (55)$$

Імовірність невизначеної відмови за параметром реактивної складової струму, що накладається на статорну обмотку, визначається за виразом

$$P_{H_{I_Y}} = \int_{-\infty}^{I_{Y_{\min}}} I_Y \int_{-\Delta I_Y}^{+\Delta I_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_Y}{2\sigma^2}} d\Delta I_Y dI_Y + \int_{I_{Y_{\max}}}^{+\infty} I_Y \int_{-\Delta I_Y}^{+\Delta I_Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{\frac{\Delta I_Y}{2\sigma^2}} d\Delta I_Y dI_Y. \quad (56)$$

Вірогідність контролю для методу, що ґрунтується на накладанні на обмотку статора змінного струму, можна розрахувати за таким виразом:

$$D = (P_{C_{U_X}} - P_{X_{U_X}})(P_{C_{U_Y}} - P_{X_{U_Y}})(P_{C_{I_X}} - P_{X_{I_X}})(P_{C_{I_Y}} - P_{X_{I_Y}}) \times \left\{ (P_{C_{U_X}} - P_{X_{U_X}} - P_{H_{U_X}})(P_{C_{U_Y}} - P_{X_{U_Y}} - P_{H_{U_Y}}) \times (P_{C_{I_X}} - P_{X_{I_X}} - P_{H_{I_X}})(P_{C_{I_Y}} - P_{X_{I_Y}} - P_{H_{I_Y}}) \right\}^{-1} \quad (57)$$

Розрахуємо вірогідність отримання результату «придатний» виходячи з виразів для абсолютних показників багатопараметричного контролю, що отримані нами вище, для основних методів захисту синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю. Параметри обмоток статора різних типів синхронних генераторів отримуємо з [15]. Результати розрахунку показані в таблиці 2.

## Висновки

В роботі запропоновано принципову схему пристрою захисту синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, від однофазних замикань на землю обмотки статора, яка реалізує новий спосіб захисту, що ґрунтується на використанні комбінованого принципу накладання постійного струму на коло, що містить ізоляцію обмотки статора для визначення активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі, використання енергії розряду попередньо зарядженого конденсатора для визначення перехідного опору в місці замикання на землю, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора відносно землі та розрахунку струму однофазного замикання на землю обмотки статора в аварійному режимі.

В роботі виконано аналіз властивостей запропонованого захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором. Запропонований захист здатен забезпечити достатню чутливість, швидкодію та надійність спрацювання.

## Література

- Loos M. Single Phase to Ground Fault in Compensated Network [Text] / M. Loos. – Lambert Academic Publishing, 2014. – 228 p.
- Басс Э. И. Релейная защита электроэнергетических систем [Текст] / Э. И. Басс, В. Г. Дорогунцев. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 296 с.

3 Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems [Text] / D. Reimert. – CRC Press, 2005. – 592 p.

4 Horowitz S. H. Power System Relaying [Text] / S. H. Horowitz, A. G. Phadke. – Research Studies Press Limited, 2008. – 331 p.

5 Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6 – 35 кВ [Текст] / М. А. Шабад. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. – 64 с.

6 Sleva A. M. Protective Relay Principles [Text] / A. M. Sleva. – CRC Press, 2009. – 368 p.

7 Elmore W. A. Protective Relaying Theory and Applications [Text] / W. A. Elmore. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 410 p.

8 Blackburn J. L. Protective Relaying: Principles and Applications [Text] / J. L. Blackburn, T. J. Domin. – Taylor & Francis Group, 2006. – 638 p.

9 Спосіб захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором: пат. 102487 Україна : МПК H02H 7/00 / О. О. Шпачук, В. М. Кутін. – № u 2015 06604 ; заявл. 06.07.2015 ; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.

10 А.с. № 1171898 (СССР). Устройство для защиты статора генератора в блоке с трансформатором от замыканий на землю / Кутин В.М., Вишнеvский В.Н., Кобылянський А.В., Рубаненко А. Е. – Б.В., 1985. – № 29.

11 А.с. № 1224892 (СССР). Устройство для защиты блоков генератор – трансформатор от замыканий на землю / Кутин В.М., Вишнеvский В.Н., Кобылянський А.В., Рубаненко А.Е., Новак С. А. – 1986. – № 14.

12 Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навчальний посібник. [Текст] / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219 с.

13 Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов. [Текст] / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

14 Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. [Текст] / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

15 Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учебное пособие для вузов. [Текст] / Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*24.10.16*

*Рекомендована до друку*

*професором Семенцовим Г.Н.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*канд. техн. наук Рубаненком О.Є.*

*(Вінницький національний технічний*

*університет, м. Вінниця)*