

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

ШПАЧУК ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.316.925

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

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті, Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
**Кутін Василь Михайлович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
завідувач кафедри електромеханічних систем  
автоматизації в промисловості і на транспорті.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Журахівський Анатолій Валентинович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри електроенергетики та систем  
управління;

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник,  
**Кошман Всеволод Іванович**,  
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,  
провідний науковий співробітник відділу оптимізації  
систем електропостачання.

Захист дисертації відбудеться « 6 » жовтня 2017р. о 10<sup>00</sup> — годині  
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому  
національному технічному університеті, МОН України за адресою: 21021,  
Україна, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК, ауд. 210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Вінницького  
національного технічного університету МОН України за адресою: 21021,  
Україна, Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ГНК.

Автореферат розісланий « 5 » вересня 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

О. Б. Бурикін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Більшість пошкоджень синхронного 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, перенапруг, механічних пошкоджень, наприклад, через вібрації стержнів обмоток і сталі магнітопроводу. Отже пошкодження можливі в будь якій частині обмоток.

В статорі виникають міжфазні (двофазні і трифазні) короткі замикання, замикання однієї фази на корпус (на землю), замикання між витками обмотки однієї фази.

Найбільш поширеним видом пошкодження в синхронних генераторах є однофазні замикання на землю. Вони складають близько  $60 \div 80$  % 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.

Дослідженнями процесів пошкодження ізоляції, а також розробкою методів та засобів захисту від однофазних замикань на землю займався ряд відомих вчених в Україні: Журахівський А. В., Кошман В. І., Кутін В. М., Назаров В. В., Сивокобиленко В. Ф., Сирота І. М., та ін.; в Росії: Вавін В. М., Вайнштейн Р. А., Ліхачьов Ф. А., Федосеев О. М., Цапенко Є.Ф., Чернобровов М. В., Шабад М. О., Шалін О. І., Шнеєрсон Е. Н. та ін.; в інших країнах: Блекбьорн Дж., Льюз М., Раймерт Д., Слева А., Фадке А., Хоровіц С.

Існує цілий ряд захистів від однофазних замикань на землю, але кожен з них має недоліки, що можуть призвести до хибних спрацювань захисту та інших негативних явищ. Основними недоліками захистів, що експлуатуються в наш час є нечутливість при поступовому зниженні опору ізоляції, невиправдані спрацювання, оскільки захисти реагують на значення величин, що опосередковано характеризують струм в місці замикання, значний час спрацювання ( $5 \div 10$  с).

Виходячи з вище викладеного матеріалу існує актуальна науково – практична задача з підвищення чутливості та швидкодії захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в плані наукових досліджень кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті і кафедри електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами: «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлювальними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона - Остроградського» (№ держреєстрації 0115U001120) та «Самооптимізація електроенергетичних систем на основі принципу найменшої дії»

(№ держреєстрації 0103U002874). Автор брав участь у виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є підвищення надійності спрацювання, чутливості та швидкодії захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, шляхом визначення значення струму в місці виникнення пошкодження.

Для досягнення мети дослідження поставлені такі задачі: проаналізувати процеси, які виникають при пошкодженні ізоляції обмотки статора генератора відносно землі, який працює в блоці з трансформатором; проаналізувати існуючі методи і засоби захисту від однофазних замикань на землю для визначення напрямків їх вдосконалення; вдосконалити існуючі методи захисту синхронних генераторів, що працюють в блоці з трансформатором від однофазних замикань на землю в обмотці статора; розробити принципову схему захисту; визначити властивості захисту; розробити алгоритм технічного обслуговування та пошуку можливих пошкоджень у пристрої захисту; обґрунтувати економічну необхідність вдосконалення захисту.

*Об'єкт дослідження* – процеси, що відбуваються при однофазному замиканні на землю в обмотці статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

*Предмет дослідження* – методи і засоби захисту обмотки статора синхронного генератора від однофазних замикань на землю.

**Методи дослідження.** Були використані теоретичні та експериментальні методи досліджень, зокрема математичної статистики та теорії ймовірності для аналізу пошкоджень обмотки статора генератора та зміни параметрів обмотки статора генератора, методи аналізу лінійних електричних кіл, чисельні методи інтегрування диференціальних рівнянь з використанням комп'ютерного симулювання для побудови математичних моделей струму однофазного замикання на землю та струму в реагуючому органі, методи теорії надійності для оцінювання показників надійності релейного захисту, методи математичного моделювання для дослідження характеристик запропонованого захисту, методи пошуку пошкоджень в дискретних об'єктах, для оптимізації алгоритму пошуку пошкоджень в пристрої релейного захисту.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Мінімізація кількості хибних спрацювань захисту від ОЗЗ в обмотці статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, забезпечується шляхом визначення струму в місці замикання на основі вимірювання загального активного опору ізоляції обмотки статора, відносно землі, перехідного опору в місці замикання, напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції відносно землі.

1. Вперше для захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, побудована математична модель яка враховує сукупність параметрів аварійного режиму, а саме параметри ізоляції обмотки статора, перехідний опір в місці замикання на землю, напругу нульової послідовності та взаємозв'язок між ними, що дозволяє обґрунтувати вибір сукупності та значень контрольованих

параметрів для визначення уставки спрацювання захисту та зменшити імовірність помилкових спрацювань захисту.

2. Вдосконалено метод захисту обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який, на відміну від відомих методів захисту, реагує на значення струму в місці замикання шляхом використання комбінованого методу накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

3. Отримав подальший розвиток метод захисту на відключення генератора від мережі, а саме одночасне виявлення зростання напруги нульової послідовності та перехідного опору в місці замикання на землю, як ознаки появи аварійного режиму, і перевищення заданої уставки спрацювання по струму, що на відміну від існуючих дозволяє відлаштуватися від впливу зовнішніх коротких замикань та завад в колі накладання.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що: виходячи з одержаних в роботі теоретичних результатів розроблено принципові схеми пристроїв захисту обмотки статора синхронного генератора від однофазних замикань на землю, що ґрунтується на комбінованому методі накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором; розраховано параметри, показники та характеристики розробленого пристрою; досліджено аварійні режими роботи пристроїв і розроблено алгоритми технічного обслуговування та пошуку його можливих пошкоджень; виконано порівняльний розрахунок вірогідності результатів контролю стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора захистами, що реалізують різні методи, в тому числі і розроблений автором, а це може бути використано при реконструкції та заміні застарілих терміналів релейного захисту.

Результати отримані в дисертаційній роботі використовуються в процесі експлуатації релейного захисту синхронних генераторів у ДП «НАЕК «Енергоатом» ВП «Хмельницька атомна електростанція» та в навчальному процесі у Вінницькому національному технічному університеті при вивченні дисципліни «Релейний захист і автоматика електричних станцій». Очікується, що це забезпечить підвищення рівня технічної підготовки персоналу станції та якість експлуатації релейного захисту, а також розширить знання студентів у цій галузі.

**Особистий внесок здобувача.** В наукових роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертаційного дослідження належать: у [1] – виконано аналіз можливих причин виникнення однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора та процесів, що відбуваються під час однофазних замикань на землю; у [2] – запропонована функціональна схема пристрою захисту обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором; у [3] – побудовано математичну модель сигналів у

реагуючому органі пристрою захисту і отримано відповідні залежності для різних типів синхронних генераторів; у [4] – запропоновано алгоритм пошуку пошкодження в схемах запропонованих пристроїв захисту; у [5] – виконано аналіз властивостей запропонованого захисту; у [6] – визначено сукупність контрольованих параметрів та параметри спрацювання захисту; у [7] – запропонована принципова схема пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, з паралельною обробкою сигналів контрольованих параметрів; у [8] – запропоновано пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, який реагує на струм в місці виникнення пошкодження; у [9] – запропоновано комбінований метод накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [1–9], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати кандидатської дисертації доповідались на III міжнародній науково – технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками» (ВНТУ, м. Вінниця, 2015р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційного дослідження опубліковані дисертантом у співавторстві у 9-ти публікаціях: 5-ох статтях у наукових фахових виданнях, 1-й статті у зарубіжному виданні, яке зареєстроване в міжнародних наукометричних базах, 1-й статті у науковому виданні України, яке зареєстроване в міжнародних наукометричних базах, 1-й тезі доповіді на конференції, отримано 1 патент на корисну модель.

**Структура та загальний обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Основний зміст викладений на 156 сторінках. Дисертація містить 23 таблиці, 37 рисунків і 9 додатків. Список використаних джерел налічує 130 найменувань. Загальний обсяг дисертації – 224 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено її зв'язок з науковими темами кафедр, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення та апробацію результатів роботи.

**У розділі 1** «Загальна характеристика об'єкту дослідження» було проаналізовано особливості конструкції, можливі місця та причини виникнення пошкоджень синхронних гідро- та турбогенераторів, розглянуто аномальні режими їх роботи. В результаті аналізу було виявлено, що на технічний стан ізоляції обмотки статора впливає велика кількість факторів. В загальному випадку будь-яке пошкодження виникає та розвивається внаслідок сукупної дії усіх груп факторів.

До зовнішньої групи факторів, відносно ізоляції обмотки статора, можна віднести: недоліки конструктивного виконання та технології виготовлення, недоліки монтажу, вплив якості технічного обслуговування та ремонтів, вплив режиму навантажень та аномальних режимів. До внутрішньої групи факторів можна віднести: електричне, теплове та механічне старіння. Теплове старіння ізоляції виникає та розвивається вже за робочих температур електроустановок (90 – 180°C) і зумовлює прискорення хімічних реакцій, які змінюють структуру матеріалів і погіршують властивості всієї ізоляції. Зміна теплового режиму роботи ізоляції впливає також на механічну міцність ізоляції. Процес механічного старіння ізоляції полягає у поступовому виникненні та збільшенні мікротріщин в ізоляції під дією статичних та динамічних механічних зусиль, які виникають під час експлуатації. Електричне старіння ізоляції відбувається при напруженості електричного поля, що в 5 – 20 разів менше за пробивну напругу. На процес електричного старіння ізоляції значно впливають такі види «повільної» поляризації як електронно-релаксаційна, міграційна та спонтанна.

За нормального режиму експлуатації генератора відбувається природний процес старіння та зношення усіх елементів його конструкції. В цьому випадку на ізоляцію обмотки статора основний вплив чинять внутрішні фактори і процес зниження рівня ізоляції обмотки статора є надзвичайно тривалим. Зовнішні фактори впливають на технічний стан ізоляції порівняно короткий час, але в результаті їх впливу виникають умови, що пришвидшують процес природного старіння ізоляції. Схема взаємного впливу різного роду факторів на стан ізоляції представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Вплив різного роду факторів на ізоляцію обмотки статора СГ

Зважаючи на значний ступінь зношення основних вузлів генераторів, що експлуатуються на території України, висувуються підвищені вимоги по чутливості та швидкодії засобів релейного захисту, автоматики та

діагностування даного типу обладнання. Існуючі засоби захисту від ОЗЗ синхронних генераторів, що працюють в блоці з трансформаторами, мають суттєві недоліки. Всі вони використовують значення параметрів величин, що опосередковано вказують на виникнення ОЗЗ, а це призводить до невиправданих відключень і недовідпуску електроенергії. Тому необхідно проводити роботу по вдосконаленню існуючих засобів захисту від ОЗЗ.

У розділі 2 «Теоретичне обґрунтування методу захисту обмотки статора синхронного генератора від однофазних замикань на землю» розглянуто модель обмотки статора синхронного генератора, яка враховує будь-які зміни параметрів обмотки. В результаті аналізу було показано, що модель ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, яка включає в себе загальний опір та загальну ємність ізоляції обмотки статора СГ відносно землі, перехідний опір в місці замикання на землю та джерело напруги нульової послідовності, що виникає в момент ОЗЗ здатна адекватно відображати процеси зміни струму ОЗЗ (рис. 2).

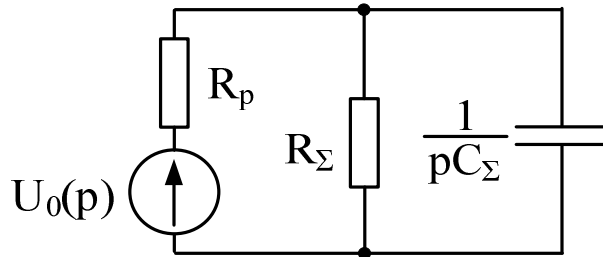


Рисунок 2 – Спрощена заступна схема

Доцільно в якості величини спрацювання пристрою захисту від ОЗЗ обрати діюче значення вимушеної складової струму однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора.

$$I = 3 \frac{U_0 R_p + U_0 R_\Sigma + U_0 R_p \omega^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + U_0 \omega C_\Sigma R_\Sigma^2}{\sqrt{2} (\omega^2 R_p^2 C_\Sigma^2 R_\Sigma^2 + R_p^2 + 2 R_p R_\Sigma + R_\Sigma^2)}, \quad (1)$$

де  $R_\Sigma$  – загальний опір ізоляції фаз обмотки статора відносно землі

$R_\Sigma = \frac{R_A R_B R_C}{R_A R_B + R_B R_C + R_A R_C}$ ;  $C_\Sigma$  – загальна ємність ізоляції фаз відносно землі

$C_\Sigma = C_A + C_B + C_C$ ;  $R_p$  – перехідний опір в місці замикання на землю;  $U_0$  – напруга нульової послідовності.

Аналіз результатів моделювання ОЗЗ обмоток різних типів турбо- та гідрогенераторів показав, що струми ОЗЗ, які викликають спрацювання пристроїв релейного захисту з'являтимуться тільки на пізній стадії розвитку пошкодження. Залежності діючого значення вимушеної складової струму ОЗЗ обмотки статорів ТГВ-300-2 та СВ 1160|180-72 показані на рис. 3,а і 3,б відповідно.



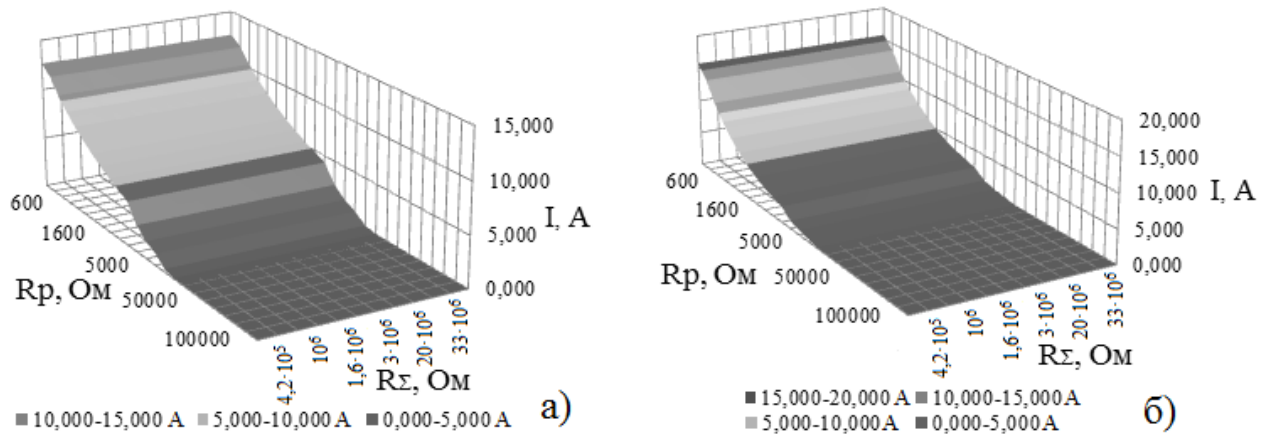


Рисунок 3 – Залежність діючого значення вимушеної складової струму ОЗЗ обмотки статора ТГВ-300-2 (а) та СВ 1160|180-72 (б), що працюють в блоці з трансформатором, від загального опору ізоляції обмотки статора та перехідного опору в місці замикання на землю

В розділі було обґрунтовано вибір комбінованого методу накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором. Використання вище зазначеного методу дозволить відстежувати поступову зміну активного опору ізоляції обмотки статора та визначати значення перехідного опору в місці замикання на землю (до 100 кОм, залежно від технічної досконалості пристрою) для розрахунку діючого значення вимушеної складової струму ОЗЗ, та формування захистом відповідних сигналів керування. Уставку спрацювання пристрою захисту «на відключення» пропонується обирати для кожного типу генератора, виходячи з максимального значення перехідного опору в місці замикання на землю ( для перехідного опору 100 кОм уставка спрацювання становить 0,001 А). Що стосується уставки спрацювання захисту «на сигнал», то пропонується використовувати розрахункові значення мінімального опору ізоляції обмотки статора відносно землі.

**У розділі 3 «Розробка апаратного та програмного забезпечення пристрою захисту»** запропоновано принципові схеми, алгоритми роботи, а також програми функціонування для двох виконань пристрою захисту, що реалізують послідовну та паралельну обробку сигналів контрольованих параметрів. Метод захисту передбачає визначення: активного опору ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі шляхом прикладання постійної напруги на коло, яке включає ізоляцію обмотки статора відносно землі (та подачу сигналу обслуговуючому персоналу при зниженні загального активного опору ізоляції відносно землі нижче уставки спрацювання); перехідного опору в місці замикання на землю шляхом вимірювання максимального значення струму розряду конденсатора; напругу нульової послідовності обмотки статора генератора; додатково вимірюють ємність ізоляції обмотки статора відносно землі перед введенням синхронного генератора в роботу або після ремонту ізоляції. За результатами вимірювання загального активного опору ізоляції

відносно землі, перехідного опору в місці замикання, врахування в розрахунках ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, напруги нульової послідовності, визначається наявність аварійного режиму за рахунок перевірки наявності кидка струму розряду конденсатора порівняно з даними первинних вимірювань і зростання напруги нульової послідовності порівняно з даними первинних вимірювань, обчислюють струм однофазного замикання на землю. У випадку, якщо розраховане значення струму однофазного замикання на землю обмотки статора перевищує уставку спрацювання, подають сигнал для відключення генератора від мережі та включення автомату гасіння поля.

Структурна схема пристрою, який реалізовує запропонований в роботі комбінований метод накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором представлено на рис. 4.

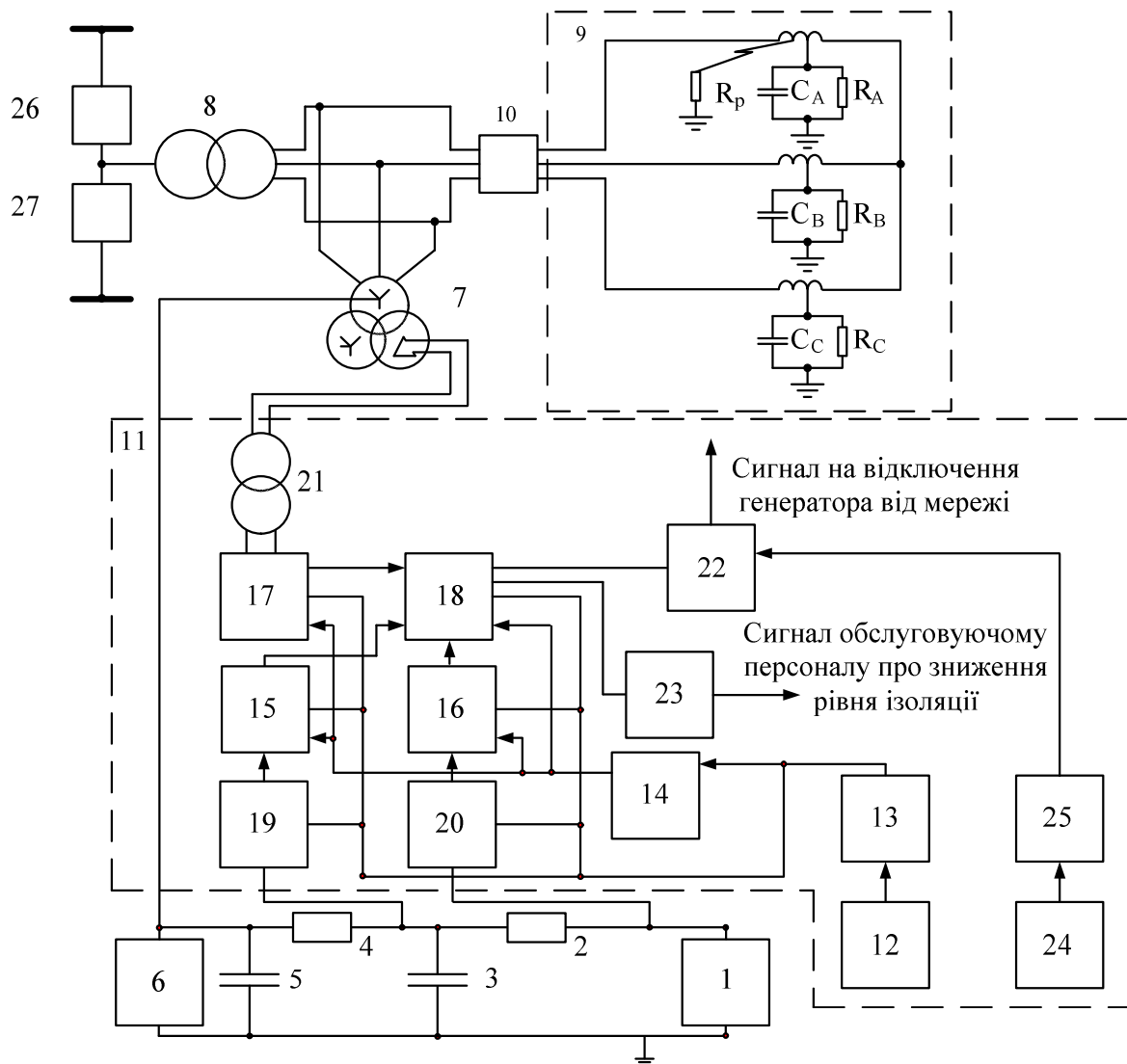


Рисунок 4 – Структурна схема реалізації методу захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором

Запропонований пристрій містить джерело випрямленої напруги 1, яке через резистор 2 підключене паралельно конденсатору 3, а через резистор 4 - до ємнісного фільтру 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 СГ через генераторний вимикач 10. Перший вхід реагуючого органу 11 підключено паралельно резистору 4, другий – до вторинної обмотки трансформатора напруги 7, включеної в «розімкнутий трикутник», третій – паралельно резистору 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 резисторам 2 і 4 відповідно. 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 пристрою 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 високовольтними вимикачами 26 і 27, через які блочний трансформатор 8 і генератор сполучені з мережею.

За відсутності пошкодження ізоляції сигнал від джерела випрямленої напруги 1 (рис. 4) накладається на коло, утворене резисторами 2 та 4, опором первинної обмотки трансформатора напруги 7 та 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

$$I_2 = I_4 = \frac{U}{R_2 + R_4 + R_T + R_\Sigma}, \quad (2)$$

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 (рис. 4) буде залежати від активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі і визначатиметься за виразом

$$U_C = U - \frac{UR_2}{R_2 + R_4 + R_T + R_\Sigma}, \quad (3)$$

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 згідно співвідношень (4, 5, 6), що представлені 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 оберненопропорційне значенню перехідного опору в місці замикання на землю. Сигнали струмів, що протікають через резистори 2 (струм оберненопропорційний загальному опору ізоляції обмотки статора відносно землі  $R_\Sigma$ ) та 4 (струм оберненопропорційний перехідному опору 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 у 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 згідно співвідношень :

$$U_0 = U_s k_T, \quad (4)$$

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.

$$R_\Sigma(I_1) = \frac{U}{I_1} - R_2 - R_4 - R_T, \quad (5)$$

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

$$R_p(I_2) = \frac{s + fI_2}{1 + gI_2 + hI_2^2}, \quad (6)$$

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 обмежуючих резисторів, а також активним та індуктивним опорами 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 опору ізоляції нижче встановленого рівня відбувається подача сигналу обслуговуючому персоналу від МК 18 через сигнальний пристрій 23. В іншому випадку відбувається визначення наявності аварійного режиму (наявність кидка струму на резисторі 4 і зростання напруги нульової послідовності порівняно з даними первинних вимірювань) та розрахунок значення струму однофазного замикання на землю обмотки статора за співвідношенням (1).

У випадку, якщо розраховане значення струму однофазного замикання на землю обмотки статора 9 перевищує уставку спрацювання, відбувається подача

сигналу з МК 18 на електронний ключ 22 для відключення генератора від мережі за допомогою високовольтних вимикачів 26 та 27. В іншому випадку, тобто тоді, коли аварійний режим роботи генератора не виявлено, МК 18 подає команду АЦП 15-17 для початку перетворення нової вибірки сигналів.

В розділі запропоновано принципові схеми пристроїв захисту, що здатні в повній мірі реалізувати комбінований метод накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором. Пристрій захисту з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів має простішу та наочнішу схему, а менша кількість елементів у схемі пристрою здатна здешевити собівартість його виготовлення. Схема з паралельною обробкою сигналів контрольованих параметрів здатна забезпечити кращий рівень швидкодії порівняно зі схемою з послідовною обробкою, оскільки для кожного сигналу контрольованого параметру передбачено свій АЦП та МК для перетворення сигналу. Особливо гостро це проявляється при вимірюванні сигналу напруги нульової послідовності, оскільки потребує вимірювання значної кількості миттєвих значень напруги, визначення середнього значення напруги за період та діючого значення напруги. Проте розподіл обчислень між різними МК є складною задачею, оскільки потребує використання та узгодження роботи різних інтерфейсів передачі даних між периферійними АЦП і МК, що виконують обробку сигналів контрольованих параметрів, а також між периферійними МК та центральним МК, що керує периферійними МК, розраховує значення струму ОЗЗ та виконує логічну частину роботи пристрою захисту.

Запропоновано метод оптимізації алгоритму пошуку пошкодження в схемах пристрою захисту, що дозволяє пришвидшити пошук пошкоджених елементів, а як наслідок скоротить час ремонту чи ревізії пристрою.

Для моделювання нормального та аварійного режиму роботи пристрою захисту використано алгоритмічний метод. Метод ґрунтується на перевірці правильності функціонування об'єкту в цілому, або окремих його частин на основі оцінювання відповідними технічними засобами логічних ознак виконання робочих дій в процесі діагностування.

Запропоновані схеми пристроїв захисту розділимо на декілька взаємопов'язаних частин, кожна з яких має своє самостійне значення. В цьому випадку як діагностична використовується, так звана, функціональна модель. Виходячи з функціональних моделей, задано всю множину можливих станів пристроїв та побудовано таблиці станів об'єктів.

Алгоритм пошуку виниклого пошкодження базується на інформаційній оцінці процесу діагностування та аналізі таблиці станів.

Функціональна модель і побудована на її основі таблиця станів дозволяє при розв'язанні діагностичних задач використовувати формальний апарат для визначення оптимальної кількості необхідних перевірок.

Функціональна схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, яка використовує паралельну обробку контрольованих сигналів представлена на рис. 5.

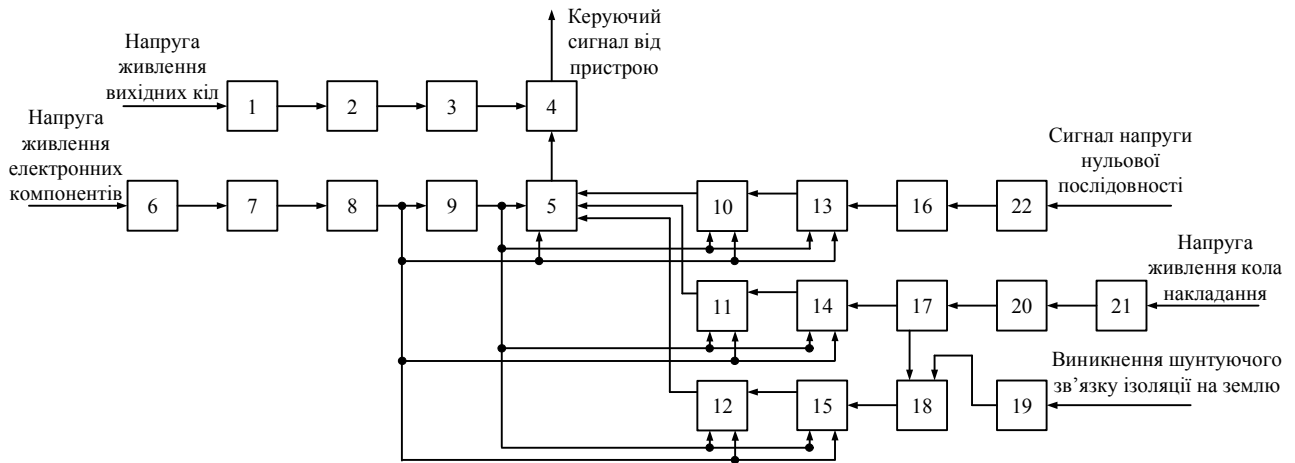


Рисунок 5 – Функціональна схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, який використовує паралельну обробку контрольованих сигналів

До функціональної схеми пристрою входять такі елементи: 1 – трансформатор живлення вихідних кіл; 2 – діодний міст; 3 – стабілізатор напруги; 4 – блок вихідних кіл; 5 – центральний МК; 6 – трансформатор живлення центрального МК та периферійних пристроїв, 7 – діодний міст; 8 – стабілізатор напруги живлення; 9 – генератор тактових імпульсів; 10 – МК, що виконує перетворення сигналу напруги нульової послідовності; 11 – МК, що виконує перетворення сигналу активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі; 12 – МК, що виконує перетворення сигналу перехідного опору в місці замикання на землю; 13 – АЦП, що виконує перетворення сигналу напруги нульової послідовності; 14 – АЦП, що виконує перетворення сигналу активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі; 15 – АЦП, що виконує перетворення сигналу перехідного опору в місці замикання на землю; 16 – проміжний трансформатор; 17 і 18 – резистори; 19 – конденсатор; 20 – діодний міст; 21 – трансформатор живлення кола накладання струму на обмотку статора; 22 – вхідний  $R-C$  фільтр.

Результати розрахунків показують, що технічне обслуговування або пошук пошкодження, пристрою захисту з паралельною обробкою сигналів контрольованих параметрів слід розпочинати з перевірки елементів обробки сигналів контрольованих параметрів, а саме МК, що виконують перетворення сигналу перехідного опору в місці замикання на землю 12, сигналу опору ізоляції обмотки статора відносно землі 11 та сигналу напруги нульової послідовності 10, оскільки саме за цими параметрами визначається наявність аварійного режиму роботи генератора та розраховується значення струму ОЗЗ обмотки статора. Наступними кроками є перевірка АЦП, що перетворюють сигнали перехідного опору в місці замикання на землю 15 та опору ізоляції обмотки статора відносно землі 14, оскільки збої в роботі даних елементів а також відповідних МК можуть спричинити хибну роботу пристрою захисту. Перевірка роботи стабілізатора напруги живлення електронних компонентів 8 є однією з обов'язкових, оскільки кидки напруги живлення можуть призводити

до збоїв у роботі електронних компонентів, а також виходу їх з ладу. Вихід з ладу елементів діодного моста кола накладання 20 спричинить коливання напруги, що призведе до хибного спрацювання пристрою захисту, а пошкодження трансформатору схеми живлення електронних компонентів 6 спричинить відмову пристрою.

Аналогічним чином виконано розрахунки для пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, який використовує послідовну обробку контрольованих сигналів. Функціональна схема представлена на рис. 6.

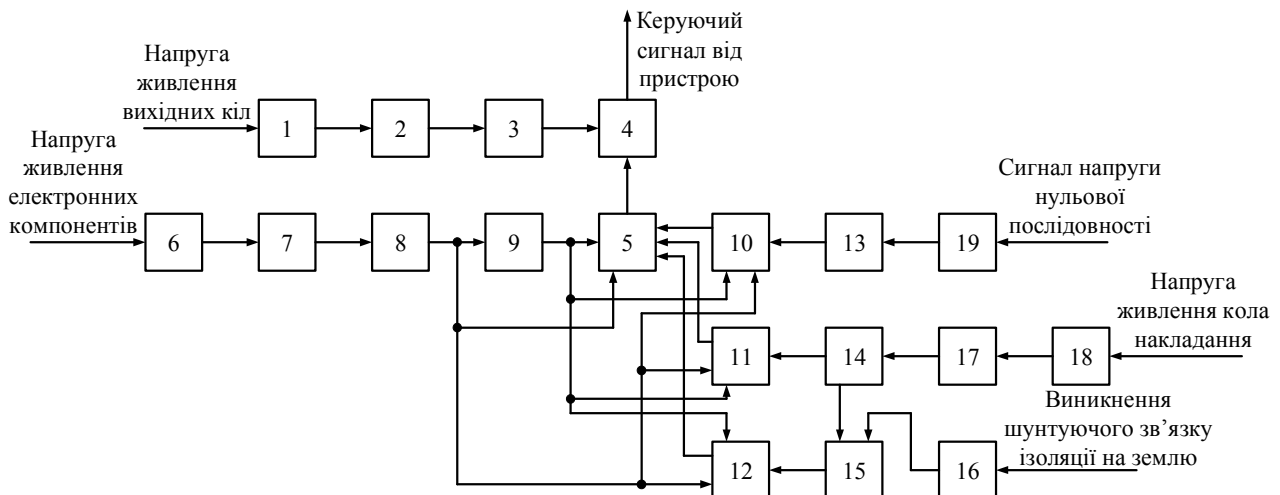


Рисунок 6 – Функціональна схема пристрою захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, який використовує послідовну обробку контрольованих сигналів

До функціональної схеми пристрою входять такі елементи: 1 – трансформатор живлення вихідних кіл; 2 – діодний міст; 3 – стабілізатор напруги; 4 – блок вихідних кіл; 5 – центральний МК; 6 – трансформатор живлення центрального МК та периферійних пристроїв, 7 – діодний міст; 8 – стабілізатор напруги живлення; 9 – генератор тактових імпульсів; 10 – АЦП, що виконує перетворення сигналу напруги нульової послідовності; 11 – АЦП, що виконує перетворення сигналу активного опору ізоляції обмотки статора відносно землі; 12 – АЦП, що виконує перетворення сигналу перехідного опору в місці замикання на землю; 13 – проміжний трансформатор; 14 і 15 – резистори; 16 – конденсатор; 17 – діодний міст; 18 – трансформатор живлення кола накладання струму на обмотку статора; 19 – вхідний R-С фільтр.

Результати розрахунків показують, що технічне обслуговування або пошук пошкодження, в пристрої захисту з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів слід розпочинати з перевірки АЦП, що виконують перетворення сигналів перехідного опору в місці замикання на землю 12 та опору ізоляції обмотки статора відносно землі 11, оскільки збої в роботі даних елементів можуть спричинити хибну роботу пристрою захисту. Наступним обов'язковим кроком є перевірка АЦП що виконує перетворення сигналу

напруги нульової послідовності 10, оскільки вихід його з ладу не дасть змоги достовірно визначити наявність аварійного режиму.

У випадку обривів елементів контуру заземлення нейтралі можливе виникнення ферорезонансу індуктивності трансформатора напруги з розземленою нейтраллю з ємністю попередньо зарядженого конденсатора, а також ємностями ізоляції генератора, трансформатора напруги, блочного трансформатора та трансформатора власних потреб на частотах  $4,5 \div 5,5$  Гц.

У розділі 4 «Розроблення, випробування пристрою захисту та оцінювання економічної ефективності його впровадження» було розраховано та підбрано елементи принципів схем для двох способів виконання пристрою захисту, що реалізують запропонований в роботі метод захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором.

Для визначення можливості селективної роботи пристроїв, при виникненні пошкоджень поза межею дії захисту, було розраховано значення напруги нульової послідовності що виникає на виводах генератора при замиканні на стороні високої напруги блочного трансформатора (табл. 1).

Таблиця 1 – Розрахункові значення напруги нульової послідовності, що виникатимуть на виводах генератора, при зовнішньому короткому замиканні

Тип генератора	Тип блочного трансформатора	$C_G, \Phi$	$C_{M0, \Phi}$	$C_{T, \Phi}$	$U_{ном}, \text{кВ}$	k	$U_{0G}, \text{В}$
ТГВ-200 М	ТДЦ-250000/150	$4 \cdot 10^{-7}$	$2,262 \cdot 10^{-9}$	$3,287 \cdot 10^{-9}$	150	0,5	80,49
ТВВ-220-2а	ТЦ-250000/150	$2,27 \cdot 10^{-7}$	$2,558 \cdot 10^{-9}$	$2,987 \cdot 10^{-9}$	150		159,02
ТГВ-300	ТДЦ-400000/330	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$3,411 \cdot 10^{-9}$	$6,62 \cdot 10^{-9}$	330		246,17
ТГВ-500	ТНЦ-630000/330	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$1,113 \cdot 10^{-9}$	$7,583 \cdot 10^{-9}$	330		770,13
ТВВ-500-2	ТНЦ-630000/330	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$3,895 \cdot 10^{-9}$	$7,927 \cdot 10^{-9}$	330		472,39
ТВВ-800-2	ТЦ-1000000/330	$2,27 \cdot 10^{-7}$	$4,609 \cdot 10^{-9}$	$9,94 \cdot 10^{-9}$	330		606,74
ТВВ-1000-4	ТЦ-1000000/330	$3,13 \cdot 10^{-7}$	$5,331 \cdot 10^{-9}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$	330		514,40
ТВВ-1000-2	3x ОРЦ 417000/750	$4 \cdot 10^{-7}$	$5,118 \cdot 10^{-9}$	$1,3897 \cdot 10^{-8}$	750	881,50	
СВ 1100 145-88	ТРДНС-63000/35	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-10}$	$7,267 \cdot 10^{-10}$	35	1	9,19
СВ 1030 120-68	ТРДНС-63000/35	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-10}$	$7,267 \cdot 10^{-10}$	35		8,19
СВ 1250 170-96	ТДЦ-125000/110	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$1,553 \cdot 10^{-9}$	$1,456 \cdot 10^{-9}$	110	0,5	16,89
СВ 1160 180-72	ТДЦ-125000/110	$8,3 \cdot 10^{-7}$	$1,553 \cdot 10^{-9}$	$1,456 \cdot 10^{-9}$	110		19,73
СВ 1500 200-88	ТДЦ-200000/110	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$2,085 \cdot 10^{-9}$	$3,048 \cdot 10^{-9}$	110		17,58

Захист фіксує підвищення напруги нульової послідовності, але не спрацьовує, через те, що передумовою спрацювання також є і поява струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, тобто виникнення шунтувального зв'язку в генераторному колі.

Було виконано розрахунок показників надійності для запропонованих принципів схем пристроїв захисту (табл. 2).



Таблиця 2 – Результати розрахунку показників надійності для пристроїв захисту

№ п.п.	Назва компоненту схеми	Пристрій з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів		Пристрій з паралельною обробкою сигналів контрольованих параметрів	
		Інтенсивності відмов, $10^{-6}$ 1/год.	Кількість елементів	Інтенсивності відмов, $10^{-6}$ 1/год.	Кількість елементів
1	Трансформатор живлення	0,0035	3	0,0035	3
2	Діодний міст	0,364	3	0,364	3
3	Стабілізатор напруги живлення	0,0041	2	0,0041	2
4	Блок вихідних кіл	0,18	1	0,18	1
5	МК	0,023	1	0,023	4
6	Генератор тактових імпульсів	0,026	1	0,026	1
7	АЦП	0,028	3	0,028	3
8	Проміжний трансформатор	0,0019	1	0,0019	1
9	Резистор	0,044	2	0,044	2
10	Конденсатор	0,173	1	0,173	1
11	Вхідний R-C фільтр	0,026	1	0,026	1
Сумарна інтенсивність відмов, $10^{-6}$ 1/год.		1,88386		1,95976	
Напрацювання на відмову, год.		530825,01		510266,56	
Імовірність безвідмовної роботи заданий час (5 років), в.о.		0,92		0,92	
Середній час безвідмовної роботи, год.		530825,01		510266,56	
Гама-відсоткове напрацювання на відмову, год.		27227,76		26173,25	

Розрахунки показують, що схема пристрою з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів має кращі показники надійності, порівняно зі схемою з паралельною обробкою сигналів, що пояснюється меншою кількістю елементів схеми, а саме МК.

В роботі було оцінено вірогідність отримання результату при багатопараметричному контролі для запропонованого методу захисту та різних методів захисту від однофазного замикання на землю, що використовуються в даний час. Результати розрахунку для однакових умов показані в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку вірогідності контролю для різних захистів від однофазного замикання на землю

Вірогідність контролю, в. о.			
Метод контролю 1-ої гармоніки напруги нульової послідовності та 3-ої гармоніки напруги	Метод накладання постійного струму	Метод накладання змінного струму	Метод, що запропонований в роботі
0,805	0,983	0,99	0,993

В розділі було виконано розрахунок ефективності вкладених у розробку коштів у випадку впровадження розробки у дрібносерійне виробництво на підприємстві, що спеціалізується на виготовленні електронних засобів релейного захисту, технологічної автоматики та інформаційно-вимірювальних систем. При загальних витратах на розробку запропонованого методу та пристроїв на рівні 89,5 тис. грн. та впровадженні у дрібносерійне виробництво термін окупності вкладених інвестицій становить 3,97 роки.

Використання методик аналітичного визначення властивостей пристроїв РЗА дозволяє скоротити час виконання даного роду робіт, а достовірність отриманих результатів дозволяє внести корективи у схеми та алгоритми роботи пристроїв ще до виготовлення дослідних зразків.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішується актуальна наукова задача вдосконалення захисту від однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, в напрямку підвищення чутливості, швидкодії та надійності його роботи шляхом мінімізації кількості хибних відключень на основі неперервного контролю значення струму в місці виникнення ОЗЗ та порівняння його з нормою для різних типів синхронного генератора.

1. Встановлено, що технічний стан ізоляції обмотки статора визначається великою кількістю факторів і цей вплив значно погіршує її електроізоляційні властивості. Фактори, що впливають на виникнення та розвиток пошкоджень ізоляції обмотки статора синхронних генераторів, можна розділити на дві групи: зовнішні (недоліки конструктивного виконання та технології виготовлення, недоліки монтажу, вплив якості технічного обслуговування та ремонтів, вплив режиму навантажень та аномальних режимів) та внутрішні (електричне, теплове та механічне старіння). У загальному випадку будь-яке пошкодження виникає та розвивається внаслідок сукупної дії усіх факторів.

Зважаючи на значний ступінь зношення основних вузлів та елементів конструкції генераторів, що наразі експлуатуються на території України, висувуються підвищені вимоги до чутливості та швидкодії засобів релейного захисту, автоматики та діагностування даного типу обладнання.

2. В роботі побудовано модель технічного стану ізоляції обмотки статора СГ, яка дозволяє враховувати пошкодження останньої. В результаті аналізу

було показано, що модель ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, яка включає в себе загальний опір та загальну ємність ізоляції обмотки статора СГ відносно землі, перехідний опір в місці замикання на землю та джерело напруги нульової послідовності, що виникає в момент ОЗЗ, здатна адекватно відображати процеси зміни струму ОЗЗ. Моделювання ОЗЗ в обмотках статора різних типів турбо- та гідрогенераторів показало, що загальноприйняті уставки спрацювання пристроїв захисту від ОЗЗ обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, є дещо завищеними, оскільки струми ОЗЗ які викликають спрацювання пристроїв релейного захисту з'являтимуться тільки на пізній стадії розвитку пошкодження (при перехідному опорі в місці замикання від  $100$  до  $3,5 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^3$  Ом).

3. Для захисту обмотки статора СГ, що працює в блоці з трансформатором, від ОЗЗ було запропоновано комбінований метод накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором. Використання вище зазначеного методу дозволить відстежувати поступову зміну активного опору ізоляції обмотки статора та визначати значення перехідного опору в місці замикання на землю для розрахунку діючого значення вимушеної складової струму ОЗЗ, та формування захистом відповідних сигналів керування. Вірогідність контролю запропонованого методу захисту становить 0,993 в.о.

4. Уставку спрацювання пристрою захисту «на відключення» пропонується обирати для кожного типу генератора, виходячи з максимального значення перехідного опору в місці замикання на землю (для перехідного опору  $100$  кОм уставка спрацювання становить від  $7,4 \cdot 10^{-4}$  до  $0,003$  А). Коефіцієнт надійності захисту за результатами розрахунку становить 1,11. Що стосується уставки спрацювання захисту «на сигнал», то пропонується використовувати розрахункові значення мінімального опору ізоляції обмотки статора відносно землі.

5. Розроблено принципові схеми, алгоритми роботи, а також розглянуто особливості програми функціонування для двох виконань пристрою захисту, що реалізують послідовну та паралельну обробку сигналів контрольованих параметрів.

При розробці принципових схем пристроїв релейного захисту та автоматики варто враховувати наявність на ринку та технічні характеристики і досконалість компонентів елементної бази на основі яких планується виготовлення пристроїв. При виборі електронних компонентів слід звернути увагу на наявність аналогів до них. Це додасть загальної гнучкості проекту при його реалізації. Принципова схема пристрою в повній мірі реалізовує закладені в методі захисту можливості.

6. Розраховано та підібрано елементи принципових схем для двох способів виконання пристроїв захисту. Виконання цієї задачі значно полегшило використання електронних каталогів компонентів компанії Transfer Multisort Elektronik Sp.z. o. o.

7. Властивості запропонованих пристроїв РЗА були досліджені шляхом моделювання. При робочій частоті 200 кГц час спрацювання захисту з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів становить 0,217 с, а з паралельною 0,214 с. Середній час безвідмовної роботи становить 530825 год. Для пристрою з послідовною обробкою сигналів контрольованих параметрів та 510266 год. для пристрою з паралельною обробкою сигналів.

Такий підхід дозволяє внести корективи у схеми та алгоритми роботи пристроїв ще до виготовлення дослідних зразків.

8. Досліджено аварійні режими роботи схем пристрою захисту і отримано алгоритми пошуку пошкоджень у пристрої з використанням інформаційного методу. Запропоновані алгоритми пошуку пошкодження в схемах пристрою захисту дозволяють пришвидшити пошук пошкоджених елементів, а як наслідок скоротять час ремонту чи ревізії пристрою. Для забезпечення надійності електронних систем слід застосовувати методи, що використовують для відновлюваних (прискорення пошуку несправностей за допомогою оптимальних алгоритмів пошуку), так і невідновлюваних систем (структурна надлишковість – резервування систем, додаткові вимірювальні канали).

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Кутін, В. М. Дослідження технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора в процесі його експлуатації [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка і енергетика". – 2013. – №2(15). – С.151–155. – ISSN 2074-2630.
2. Кутін, В. М. Удосконалення засобів захисту від однофазних замикань на землю в обмотці статора синхронного генератора [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – №2(22). Частина 2. – С.393–396. – ISSN 2072-2052.
3. Кутін, В. М. Моделювання струму в реагуючому органі пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – №6 – С.48–51. – ISSN 1997-9266.
4. Кутін, В. М. Алгоритм пошуку пошкодження в пристроях захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – №6 – С. 231–238. – ISSN 2307-5732.
5. Кутін, В. М. Вдосконалення захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Нафтогазова енергетика. – 2016. – №2 – С.47–56. – ISSN 1993-9868.
6. Кутін, В. М. Сукупність контрольованих параметрів та параметр спрацювання пристрою захисту від однофазних замикань на землю обмотки

статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Молодий вчений. – 2014. – №12 – С.13–15. – ISSN 2304-5809.

7. Vasyl Kutin. Protection against single phase ground fault of the stator winding synchronous generator [Text]/ Vasyl Kutin, Oleksandr Shpachuk // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. Vienna. – 2016. – №1-2 – P.118–121. – ISSN 2310-5607.

8. Кутін, В. М. Пристрій захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // III Міжнародна науково – технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками», 14 – 15 жовтня 2015 р., Вінниця, Україна: тези доп. / Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2015 – С. 37.

9. Пат. 102487 Україна, МПК Н02Н 7/00. Спосіб захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором [Текст] / О. О. Шпачук, В. М. Кутін; заявники О. О. Шпачук, В. М. Кутін. – u 2015 06604 ; Заявл. 06.07.2015 ; Опубл. Бюл. №20, 26.10.2015.

## АНОТАЦІЯ

**Шпачук О. О. Вдосконалення методу захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Вінницький національний технічний університет. – Вінниця, 2017.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі вдосконалення методу і засобів захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, працюючого в блоці з трансформатором, що проявляється в урахуванні значень параметрів, які впливають на значення струму в місці однофазного замикання на землю.

В роботі розглянуто основні фактори та процеси, що впливають на зміну технічного стану ізоляції обмотки статора синхронного генератора відносно землі в процесі його експлуатації. В якості параметру спрацювання захисту від однофазного замикання на землю обмотки статора синхронного генератора, що працює в блоці з трансформатором, запропоновано використовувати діюче значення струму однофазного замикання на землю.

Запропоновано метод та пристрої захисту від однофазних замикань на землю обмотки статора синхронного генератора, працюючого в блоці з трансформатором, робота яких ґрунтується на розрахунку струму в місці виникнення однофазного замикання на землю, за допомогою використання комбінованого методу накладання постійного струму, використання струму розряду попередньо зарядженого конденсатора, контролю напруги нульової

послідовності та врахування ємності ізоляції обмотки статора синхронного генератора.

Запропонований захист спрацьовує на сигнал при симетричному зниженні опору ізоляції обмотки статора відносно землі, а також на відключення генератора від мережі у випадку виявлення аварійного режиму із струмом замикання на землю більше значення уставки.

Також проведено дослідження властивостей і характеристик запропонованого методу та пристроїв захисту. Розроблено алгоритм пошуку пошкодження в пристрої релейного захисту.

**Ключові слова:** синхронний генератор, обмотка статора, ізоляція, технічний стан, однофазне замикання на землю, релейний захист.

## ABSTRACT

**Shpachuk O. O. Improving of method of protection from single-phase ground fault of the stator winding of synchronous generator which works in a block with a transformer.** – Manuscript.

This is dissertation for receiving the degree of the candidate of technical study with speciality 05.14.02 – electric stations, networks and systems. - Vinnytsia National Technical University. – Vinnytsia, 2017.

The given paper describes the solution of actual, scientific and applied tasks of improving a method and means of defense from single-phase ground fault of the stator winding of synchronous generator which works in a block with a transformer, which appears in consideration of terminal significances and which consequently have effect on importance of current in a place of single-phase ground fault.

This research investigates the main features and processes which have effect on changing of technical condition of insulation of the stator winding of the synchronous generator during its exploitation. As a parameter of operation of protection from single-phase ground fault of the stator winding of synchronous generator which works in a block with a transformer, effective value of current of single-phase ground fault is proposed to use.

This work presents a method and guard devices from single-phase ground fault of the stator winding of synchronous generator which works in a block with a transformer. Their work is based on the calculation of the current in a place of a single-phase ground fault, by using the combined principle of imposing a direct current, using a current of discharge of pre-charged capacitor, measuring of voltage of zero-sequence and taking into account a capacitance of insulation of the stator winding of synchronous generator which works in a block with a transformer.

This suggested protection react on the signal during symmetrical lowering of resistance isolation of the stator winding and also it reacts on the disconnection of generator from network in case of detection of emergency conditions with current of locking on the ground.

Also, the important research of qualities and characteristics of proffering method and guard devices is carried out. An algorithm of searching the faults in a gear of relay protection is developed.

**Keywords:** synchronous generator, stator winding, insulation, technical condition, single-phase ground fault, relay protection.

## АННОТАЦИЯ

**Шпачук А. А. Усовершенствование метода защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора синхронного генератора работающего в блоке с трансформатором. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 - электрические станции, сети и системы. - Винницкий национальный технический университет. – Винница, 2017.

В работе рассмотрены основные факторы и процессы, влияющие на изменение технического состояния изоляции обмотки статора синхронного генератора относительно земли в процессе его эксплуатации. Предложено в качестве показателя качества функционирования изоляции обмотки статора синхронного генератора использовать значение тока однофазного замыкания на землю.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи совершенствования метода и средств защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, проявляющемуся в учете значений параметров, влияющих на значение тока в месте однофазного замыкания на землю.

В работе построена модель технического состояния изоляции обмотки статора синхронного генератора, работающего в блоке с трансформатором, которая учитывает любые изменения параметров обмотки, включающая в себя общее сопротивление и общую емкость изоляции обмотки статора синхронного генератора (СГ) относительно земли, переходное сопротивление в месте замыкания на землю и источник напряжения нулевой последовательности, возникающий в момент однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Моделирование ОЗЗ в обмотках статора различных типов турбо- и гидрогенераторов показало, что общепринятые уставки срабатывания устройств защиты от ОЗЗ обмотки статора СГ, работающего в блоке с трансформатором, несколько завышенными, поскольку токи ОЗЗ которые вызывают срабатывания устройств релейной защиты возникают только на поздней стадии развития повреждения (при переходном сопротивлении в месте замыкания от 100 Ом до  $3,5 \div 4$  кОм).

Для защиты обмотки статора СГ от ОЗЗ предложен комбинированный метод наложения постоянного тока, использование тока разряда предварительно заряженного конденсатора, контроля напряжения нулевой последовательности и учета емкости изоляции обмотки статора СГ, работающего в блоке с трансформатором. Использование вышеуказанного метода позволит отслеживать постепенное изменение активного сопротивления изоляции обмотки статора и определять значение переходного сопротивления в месте замыкания на землю (до 100 кОм, в зависимости от технического

совершенства устройства) для расчета действующего значения вынужденной составляющей тока ОЗЗ и формирования защитой соответствующих сигналов управления.

Уставки срабатывания устройства защиты «на отключение» предлагается выбирать для каждого типа генератора, исходя из максимального значения переходного сопротивления в месте замыкания на землю. Что касается уставки срабатывания защиты «на сигнал», то предлагается использовать расчетные значения минимального сопротивления изоляции обмотки статора относительно земли.

В работе предложены принципиальные схемы, алгоритмы работы, а также рассмотрены особенности программы функционирования для двух исполнений устройства защиты, реализующих последовательную и параллельную обработку сигналов контролируемых параметров. Свойства предложенных устройств РЗА были исследованы путем моделирования.

Исследованы аварийные режимы работы схем устройства защиты и получены алгоритмы поиска повреждений в устройстве с использованием информационного метода.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, обмотка статора, изоляция, техническое состояние, однофазное замыкание на землю, релейная защита.



Підписано до друку 29. 08. 2017 р. Формат 29.7×42¼  
Наклад 100 прим. Зам. № 2017 – 320.  
Віддруковано в інформаційному редакційно – видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.:59-87-38  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.