

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

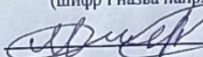
# МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

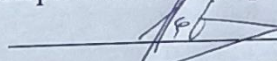
## «ЗАХИСТ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВт»

Виконав: студент 2-го курсу, групи 2ЕС-23м  
спеціальності 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка освітня  
програма «Електричні станції»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

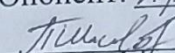
 Мельник О.Л.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., професор каф. ЕСС

 Рубаненко О.Є.  
(прізвище та ініціали)

« 06 » 12 2024 р.

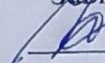
Опонент: проф каф ЕСС ЕМ

 Терешкевич А.Б.  
(прізвище та ініціали)

« 09 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕСС

 д.т.н., проф. Комар В. О.  
(прізвище та ініціали)

« 06 » 12 2024 р.

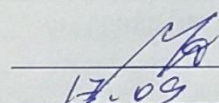
Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет  
 Факультет електроенергетики та електромеханіки  
 Кафедра електричних станцій та систем  
 Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
 Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»  
 Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
 Освітньо-професійна програма – Електричні станції

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри ЕСС**

д.т.н., професор Комар В. О.

  
 17.09 2024 року

## З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

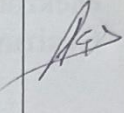
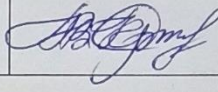
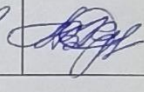
Мельника Олександра Леонідовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. Захист гідрогенераторів 100 МВт  
 керівник роботи к.т.н., проф., професор каф. ЕСС Рубаненко О.Є.  
 затверджена наказом ВНТУ від «17» вересня 2024 року № 310
2. Строк подання студентом роботи 28 листопада 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Кідиба, В. П. Релейний захист електроенергетичних систем: навч. посіб./ В. П. Кідиба. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 504 с; Параметри гідрогенератора СВ-1500/170-96 90 (СВ-вертикальний синхронний генератор).  $S_n = 117.65$  МВА;  $P_n = 100$  МВт;  $U_n = 13.8$  кВ,  $I_n = 4.92$  кА;  $\cos \varphi = 0.85$ ,  $p_{об} = 62.5$  об/хв,  $OK3 = 1.75$ ,  $x_d'' = 0.21$ ,  $x_d' = 0.21$ ,  $x_d = 0.29$ ,  $x_d = 0.65$ ,  $x_q'' = 0.23$ ,  $T_{d0} = 5.3$  сек,  $I_{fном} = 1795$  А,  $I_{fном} / I_{fx} = 1.75$ ,  $U_{fном} = 430$  В,  $K_f = 2.2$
4. Зміст текстової частини:  
Вступ; 1 Конструктивні та експлуатаційні особливості гідрогенераторів потужністю 100 МВт; 2 Проектування системи релейного захисту для гідрогенераторів 100 МВт; 3. Види аварійних режимів роботи гідрогенераторів та їх вплив на надійність; 4. Оцінка надійності та ефективності системи гідрозахисту гідрогенераторів 100 МВт; 5 Проектування релейного блоку захисту генератор-трансформатор ГЕС з гідрогенератором типу СВ-1500/170-96 6 6 Заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок; 7 Економічна частина; Висновки Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
2. Актуальність; 3. Мета і завдання; 4. Об'єкт, предмет дослідження та новизна; 5. Види захистів гідрогенераторів; 6-7 Конструктивні та експлуатаційні особливості гідрогенераторів; 8. Проектування релейного захисту блоку гідрогенератор-трансформатор; 9. Розрахунок струмів кз; 10. Захист від багатофазних КЗ в обмотці статора; 11. Захист

обмотки статора від зовнішніх несиметричних КЗ ; 12. Захист від багатофазних К обмотці статора ; 13. Економфчні розрахунки; 14. Висновки.

#### 6. Консультанти розділів роботи

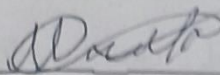
| Розділ             | Прізвище, ініціали та посада консультанта                                | Підпис, дата                                                                        |                                                                                     |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                                                          | завдання видав                                                                      | виконання прийняв                                                                   |
| Спеціальна частина | Керівник роботи<br>Рубаненко О.Є.<br>к.т.н., проф., проф.<br>кафедри ЕСС |  |  |
| Економічна частина | Остра Н. В.,<br>к.т.н., доц., доцент<br>кафедри ЕСС                      |  |  |

7. Дата видачі завдання 18 вересня 2023 року

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

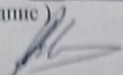
| № з/п | Назва етапів<br>магістерської кваліфікаційної роботи                                                      | Строк виконання<br>етапів роботи |          | Пр<br>мп |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------|----------|
|       |                                                                                                           | початок                          | кінець   |          |
| 1     | Розроблення технічного завдання                                                                           | 18.09.24                         | 20.09.24 | б.       |
| 2     | Конструктивні та експлуатаційні особливості гідрогенераторів потужністю 100 МВт                           | 21.09.24                         | 25.09.24 | б.       |
| 3     | Проектування системи релейного захисту для гідрогенераторів 100 МВт                                       | 26.09.24                         | 26.10.24 | б.       |
| 4     | Види аварійних режимів роботи гідрогенераторів та їх вплив на надійність                                  | 27.10.24                         | 1.11.24  | б.       |
| 5     | Проектування релейного блоку захисту генератор-трансформатор ГЕС з гідрогенератором типу СВ-1500/170-96 6 | 2.11.24                          | 6.11.24  | б.       |
| 6     | Оцінка надійності та ефективності системи гідрозахисту гідрогенераторів 100 МВт                           | 7.11.24                          | 10.11.24 | б.       |
| 7     | Заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок                                   | 11.11.24                         | 15.11.24 | б.       |
| 8     | Економічна частина                                                                                        | 16.11.24                         | 20.11.24 | б.       |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки                                                                          | 21.11.24                         | 24.12.24 | б.       |
| 10    | Виконання графічної частини та оформлення презентації                                                     | 25.12.24                         | 28.12.24 | б.       |
|       | Захист МКР                                                                                                | I декада грудня (за графіком)    |          |          |

Студент

  
(підпис)

О.Л. Мельник

Керівник роботи

  
(підпис)

О.Є. Рубаненко

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.311.1

Мельник Олександр Леонідович «Релейний захист гідрогенератора 100 МВт». Магістерська кваліфікаційна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.  
Вінниця : ВНТУ. 2024. 105 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 17 назв; рис.: 14; табл. 3.

В магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено конструктивні та експлуатаційні особливості, проектування, види аварійних режимів роботи та оцінка ефективності системи релейного захисту гідрогенератора 100 МВт.

У роботі розглянуто основні принципи експлуатації та проектування гідрогенераторів на гідростанції, а також, особливості роботи в аварійних режимах що виникають у гідрогенераторах, проаналізовано надійність та ефективність систем захисту.

Запропоновано технічні рішення для вдосконалення роботи захисних систем на ГЕС. Проаналізовано витрати на проектування релейного захисту гідрогенератора, окупність проєкту, економічний ефект та енергоефективність на впровадження мікропроцесорного релейного захисту.

Ключові слова: релейний захист, гідрогенератор, проектування гідрогенераторів на станції.

## **ABSTRACT**

Melnyk Oleksandr Leonidovich “Relay protection of a 100 MW hydrogenerator”. Master's qualification work in the specialty 141 – Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics.

Vinnytsia: VNTU. 2024. 105 p.

In Ukrainian. Bibliography: 17 titles; fig.: 14; table. 3.

The master's qualification work investigated the design and operational features, design, types of emergency modes of operation and assessment of the effectiveness of the relay protection system of a 100 MW hydrogenerator.

The work considered the basic principles of operation and design of hydrogenerators at the station, as well as the features of operation in emergency modes that arise in hydrogenerators, analyzed the reliability and effectiveness of protection systems and made proposals for increasing the stability of the system.

Technical solutions were proposed to improve the operation of protective systems. Cost analysis, project payback, economic effect and energy efficiency for the implementation of relay protection.

In the occupational safety section...

Keywords: relay protection, hydrogenerator, design of hydrogenerators at the station.

## ЗМІСТ

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>                                                          | <b>6</b>  |
| <b>ВСТУП.....</b>                                                                              | <b>7</b>  |
| <b>1 КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ПОТУЖНІСТЮ 100 МВт .....</b> | <b>9</b>  |
| 1.1 Загальна конструкція і принцип роботи гідрогенератора 100 МВт.....                         | 9         |
| 1.2 Основні характеристики та робочі режими.....                                               | 10        |
| 1.2.1 Робочі режими гідрогенератора .....                                                      | 11        |
| 1.3 Особливості та проблеми експлуатації на високих потужностях .....                          | 12        |
| 1.3.1 Основні особливості експлуатації на високих потужностях .....                            | 12        |
| 1.3.2 Проблеми експлуатації на високих потужностях .....                                       | 13        |
| 1.3.3 Заходи для подолання проблем.....                                                        | 14        |
| Висновки до розділу 1 .....                                                                    | 15        |
| <b>2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВт .....</b>             | <b>16</b> |
| 2.1 Вибір реле для різних типів захисту .....                                                  | 16        |
| 2.2 Схема підключення релейного захисту до гідрогенератора .....                               | 18        |
| 2.2.1 Основні елементи схеми релейного захисту .....                                           | 18        |
| 2.2.2 Загальна схема підключення електричних апаратів до гідрогенератора.....                  | 18        |
| 2.3 Розробка алгоритмів роботи для кожного виду релейного захисту .....                        | 20        |
| 2.4 Моделювання роботи релейного захисту під час аварійних ситуацій та оцінка надійності ..... | 23        |
| Висновки до розділу 2 .....                                                                    | 24        |
| <b>3 ВИДИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ І ЇХ ВПЛИВ НА НАДІЙНІСТЬ.....</b>          | <b>25</b> |
| 3.1 Аналіз типових аварійних режимів, що можуть виникати при роботі гідрогенератора.....       | 25        |

|                                                                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 Причини та наслідки коротких замикань, перевантажень, витоків струму .....                                        | 28        |
| 3.3 Негативний вплив аварійних режимів на роботу гідрогенераторів та обладнання електростанції.....                   | 29        |
| 3.4 Сучасні мікропроцесорні захисти гідрогенераторів.....                                                             | 31        |
| Висновки до розділу 3 .....                                                                                           | 33        |
| <b>4 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВт .....</b>                             | <b>34</b> |
| 4.1 Методи оцінки надійності релейного захисту.....                                                                   | 34        |
| 4.2 Аналіз ефективності впроваджених заходів.....                                                                     | 35        |
| 4.3 Пропозиції щодо підвищення стійкості релейного захисту .....                                                      | 37        |
| Висновки до розділу 4 .....                                                                                           | 38        |
| <b>5 ПРОЄКТУВАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ БЛОКУ ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР ГЕС З ГІДРОГЕНЕРАТОРОМ ТИПУ СВ-1500/170-96.....</b> | <b>39</b> |
| 5.1 Захист трансформаторів та автотрансформаторів .....                                                               | 39        |
| 5.1.1 Захисти гідрогенератора 100 МВт.....                                                                            | 43        |
| 5.2 Захист генератора від несиметричних режимів .....                                                                 | 48        |
| 5.2.1 Захист обмотки статора генератора від підвищення напруги .....                                                  | 51        |
| 5.3 Опис схеми релейного захисту блоку генератор-трансформатор .....                                                  | 65        |
| 5.4 Розрахунок релейного захисту блоку "Генератор-трансформатор" .....                                                | 68        |
| 5.4.1 Розрахунок струмів КЗ для вибору уставок захисту .....                                                          | 69        |
| 5.4.2 Захист від багатофазних КЗ в обмотці статора і на його виводах.....                                             | 70        |
| 5.4.3 Захист від замикань на землю в обмотці статора .....                                                            | 71        |
| 5.4.4 Захист обмотки статора від зовнішніх симетричних КЗ.....                                                        | 72        |
| 5.4.5 Захист від КЗ між витками однієї фази обмотки статора.....                                                      | 73        |
| 5.4.6 Захист обмотки статора від зовнішніх несиметричних КЗ та несиметричних перевантажень.....                       | 73        |
| 5.4.7 Захист обмотки статора від симетричних перевантажень .....                                                      | 74        |

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.4.8 Захист ротора від перевантаження струмом збудження.....                                                                                 | 75        |
| 5.4.9 Часовий додатковий захист ротора від перевантаження струмом збудження при його роботі з резервним збудником.....                        | 75        |
| 5.4.10 Захист від асинхронного режиму при втраті збудження.....                                                                               | 76        |
| 5.4.11 Захист від підвищення напруги на виводах ТГ і БТ .....                                                                                 | 76        |
| 5.4.12 Захист від замикань на землю в одній точці кола ротора.....                                                                            | 77        |
| 5.4.13 Захист від усіх видів КЗ в обмотках трансформатора, на його виводах, ошиновці ВН та від багатозаземлених КЗ в обмотці статора ТГ ..... | 77        |
| 5.4.14 Захист від замикань в середині кожуха трансформатора .....                                                                             | 78        |
| 5.4.15 Захист від зовнішніх КЗ на землю в мережі з заземленими нейтраллями при роботі трансформатора з заземленою нейтраллю .....             | 78        |
| Висновки до розділу 5 .....                                                                                                                   | 80        |
| <b>6 ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ТА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК.....</b>                                                         | <b>81</b> |
| 6.1 Задачі розділу.....                                                                                                                       | 81        |
| 6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта.....                                                                                    | 82        |
| 6.2.1 Санітарно-гігієнічні вимоги до робочого середовища користувача ПК .....                                                                 | 82        |
| 6.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії .....                                                                             | 86        |
| 6.3.1 Мікроклімат .....                                                                                                                       | 86        |
| 6.3.2 Склад повітря робочої зони.....                                                                                                         | 86        |
| 6.3.3 Виробниче освітлення .....                                                                                                              | 87        |
| 6.3.4 Виробничий шум.....                                                                                                                     | 89        |
| 6.3.5 Розрахунок захисного заземлення .....                                                                                                   | 90        |
| Висновки до розділу 6 .....                                                                                                                   | 94        |
| <b>7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА .....</b>                                                                                                             | <b>95</b> |
| 7.1 Аналіз витрат та впровадження релейного захисту та окупність проекту .....                                                                | 95        |

|                                                                                                    |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.2 Економічний ефект від зниження аварійності та збільшення надійності обладнання .....           | 97         |
| 7.3 Вплив впровадження релейного захисту на енергоефективність та екологічну безпеку станції ..... | 99         |
| Висновки до розділу 7 .....                                                                        | 101        |
| <b>ВИСНОВКИ .....</b>                                                                              | <b>103</b> |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>                                                             | <b>104</b> |
| <b>ДОДАТКИ .....</b>                                                                               | <b>106</b> |
| Додаток А. Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень .....       | 107        |
| Додаток Б. Технічне завдання МКР.....                                                              | 108        |
| Додаток В. Ілюстративна частина .....                                                              | 112        |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

**РНП** – реле нульової послідовності;

**РЗ** – релейний захист;

**ПЗ** – програмне забезпечення;

**ККД** – коефіцієнт корисної дії;

**РМН** – реле мінімальної напруги;

**АПВ** – автоматичне повторне відключення;

**ТС** – трансформатор струму;

**ТН** – трансформатор напруги;

## ВСТУП

РЗ є однією з найважливіших складових забезпечення надійної та безпечної роботи енергетичних систем. Особливе значення РЗ має у випадку гідрогенераторів великої потужності, таких як генератори потужністю 100 МВт, які є ключовими елементами енергетичних об'єктів. В умовах сучасного розвитку енергетики підвищення ефективності, точності та швидкодії релейного захисту гідрогенераторів сприяє зменшенню аварійності, мінімізації економічних втрат та підвищенню стабільності енергетичних мереж [1-4].

**Актуальність теми** обумовлена високими вимогами до надійності функціонування енергетичного обладнання в умовах зростання масштабів і складності енергетичних систем. Застосування сучасних технологій, таких як мікропроцесорні пристрої захисту, забезпечує новий рівень контролю та діагностики, дозволяючи оперативно реагувати на нештатні ситуації, що можуть виникати в роботі гідрогенераторів [5, 6].

**Мета** дослідження полягає в аналізі, розробці та вдосконаленні систем релейного захисту для гідрогенераторів потужністю 100 МВт з урахуванням їх конструктивних, технологічних і експлуатаційних особливостей.

**Задачі.** Відповідно до мети в роботі вирішуються наступні задачі:

1. Розглянути основні принципи побудови релейного захисту гідрогенераторів,
2. Дослідити типові режими роботи,
3. Дослідити можливі аварійні ситуації.
4. Проаналізувати сучасні системи релейного захисту гідрогенераторів
5. Визначити уставки спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт.
6. Визначити економічні показники впровадження мікропроцесорних захистів на ГЕС.

Результати роботи можуть бути використані для модернізації систем релейного захисту існуючих гідрогенераторів, а також при проєктуванні нових

енергетичних установок, що сприятиме підвищенню їх надійності та ефективності.

**Об’єктом** досліджень є процеси зміни струмів і напруг в гідрогенераторі 100 МВт в аварійних та особливих режимах експлуатації.

**Предметом** досліджень є захисти синхронних генераторів на електричних стаціях.

**Апробація.** Результати досліджень доповідались на конференціях ВНТУ.

**Новизна** отриманих результатів полягає в результатах аналізу особливостей електромеханічних та мікропроцесорних захистів гідрогенератора 100 МВт.

**Практична цінність** роботи полягає в результатах розрахунків уставок спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт

# **1 КОНСТРУКТИВНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ ПОТУЖНІСТЮ 100 МВт**

## **1.1 Загальна конструкція і принцип роботи гідрогенератора 100 МВт**

Гідрогенератор на 100 МВт — це потужна установка, яка перетворює енергію водяного потоку на електричну енергію, використовуючи механічні та електромагнітні процеси. Принцип роботи гідрогенератора ґрунтується на перетворенні кінетичної та потенціальної енергії води в обертовий рух, який генерує електроенергію за допомогою електромагнітної індукції [7].

Основні конструктивні елементи гідрогенератора:

1) Турбіна: Вона приймає на себе енергію потоку води. Турбіна з'єднана з ротором генератора через вал. Найчастіше для потужних гідрогенераторів використовують реактивні турбіни, наприклад, капланові або пропелерні турбіни, що працюють при великому потоці і середніх напорах води.

2) Ротор (якір): Частина генератора, яка обертається і створює магнітне поле. Ротор має на собі обмотки або постійні магніти, які обертаються всередині статора. Від швидкості обертання ротора залежить частота вироблюваного змінного струму.

3) Статор: Нерухома частина гідрогенератора, в якій розташовані обмотки. Коли магнітне поле ротора перетинає обмотки статора, генерується електричний струм за принципом електромагнітної індукції.

4) Вал: З'єднує турбіну з ротором і передає обертовий момент. Вал обертає ротор за рахунок енергії, що надходить від турбіни.

5) Система збудження: Забезпечує створення магнітного поля в роторі, використовуючи електромагніти або постійні магніти. У потужних гідрогенераторах застосовують складні системи автоматичного збудження для регулювання вироблення електроенергії.

6) Охолоджувальна система: Необхідна для відведення тепла, яке виділяється під час роботи генератора. Система охолодження використовує воду або повітря для підтримки оптимальної температури.

Принцип роботи:

1) Подача води на турбіну: Вода надходить під високим тиском на лопаті турбіни, створюючи обертальний рух. Чим більший потік і напір води, тим більша потужність, яку може забезпечити турбіна.

2) Перетворення енергії в механічний рух: Турбіна, обертаючись, передає механічну енергію через вал на ротор генератора.

3) Генерування електроенергії: При обертанні ротора його магнітне поле взаємодіє з обмотками статора, що призводить до індукції електрорушійної сили в статорі. Це і є змінний струм, який передається до мережі через трансформатори і системи розподілу.

4) Регулювання потужності: Потужність гідрогенератора можна регулювати зміною обсягу подачі води та системою збудження, щоб забезпечувати стабільне виробництво електроенергії при змінах навантаження.

Додаткові особливості та переваги:

1) Стабільність роботи: Важливим є підтримка стабільних обертів ротора, щоб уникнути коливань у виробництві струму.

2) Надійність: Велика потужність і постійна робота вимагають високої надійності компонентів.

3) Ефективність: Конструкція має бути максимально ефективною, щоб звести до мінімуму втрати енергії на механічне тертя, нагрівання та інші фактори.

## **1.2 Основні характеристики та робочі режими**

Гідрогенератор потужністю 100 МВт має кілька важливих характеристик та робочих режимів, що визначають його продуктивність, надійність і ефективність.

### Основні характеристики:

- 1) Номінальна потужність: 100 МВт — максимальна потужність, яку генератор може виробляти при оптимальних умовах роботи.
- 2) Напруга на виході: Типово 10,5–15 кВ. Це стандартний діапазон, при якому генератор працює, щоб забезпечити стабільний вихід для передачі електроенергії через трансформатори на більш високі напруги для розподільчих мереж.
- 3) Частота: 50 Гц для Європи, включно з Україною, та 60 Гц для країн, де використовується цей стандарт. Частота визначається швидкістю обертання ротора та має залишатися стабільною для сумісності з енергосистемою.
- 4) Швидкість обертання ротора: В залежності від конструкції турбіни та генератора — зазвичай від 75 до 300 обертів за хвилину. Гідрогенератори великих потужностей часто мають низькошвидкісні роторні системи для зменшення зносу і підвищення ефективності.
- 5) ККД: Зазвичай у межах 95-98%, що означає мінімальні втрати енергії під час перетворення механічної енергії води в електричну.
- 6) Система збудження: Автоматична система, що підтримує необхідне магнітне поле для стабільної роботи генератора. Система збудження може бути або постійного струму, або на основі силових напівпровідників.
- 7) Маса: Гідрогенератори на 100 МВт мають значну масу, яка може сягати декількох сотень тонн залежно від конструкції.

#### **1.2.1 Робочі режими гідрогенератора:**

- 1) Номінальний режим: Генератор працює на повну потужність (100 МВт) при оптимальних умовах, забезпечуючи постійний рівень вироблення електроенергії. У цьому режимі система збудження підтримує стабільну напругу та частоту.
- 2) Режим часткового навантаження: Генератор працює на зниженій потужності, наприклад, коли спостерігається зниження водного потоку. У

такому випадку турбіна зменшує подачу енергії на вал генератора, а система збудження коригує магнітне поле для забезпечення стабільної напруги.

3) Піковий режим: Використовується, коли потрібно швидко збільшити вироблення електроенергії для задоволення пікового попиту. Гідрогенератор може працювати на підвищеній потужності (більше за номінальну) протягом короткого часу, проте це збільшує навантаження на компоненти генератора.

4) Режим синхронізації: Включення генератора в мережу відбувається з узгодженням частоти та напруги з параметрами енергосистеми. Це важливий етап, щоб уникнути аварійних ситуацій.

5) Режим холостого ходу: Використовується для перевірки працездатності генератора без навантаження. У цьому режимі обертається ротор, але без подачі енергії на мережу. Це потрібно для технічного обслуговування або тестування.

6) Режим аварійного вимкнення: Спрацьовує в разі аварійних ситуацій, коли потрібно миттєво зупинити генератор через проблеми з напругою, частотою чи механічними неполадками. Цей режим захищає обладнання від пошкоджень.

### **1.3 Особливості та проблеми експлуатації на високих потужностях**

Експлуатація гідрогенераторів потужністю 100 МВт на високих потужностях пов'язана з рядом технічних та експлуатаційних особливостей, а також проблемами, які вимагають ретельного моніторингу та обслуговування.

#### **1.3.1 Основні особливості експлуатації на високих потужностях**

1) Високі теплові навантаження: На високих потужностях в генераторі генерується значна кількість тепла. Система охолодження повинна ефективно відводити надлишкове тепло, щоб уникнути перегріву обмоток статора і ротора, які можуть привести до пошкодження ізоляції та скорочення терміну служби генератора [7].

2) Стабільність магнітного поля: При високих потужностях генератор працює зі значним збуджуючим струмом, щоб підтримувати стабільне магнітне поле. Нестабільність магнітного поля може призвести до коливань напруги, які небезпечні для енергомережі.

3) Збільшене навантаження на підшипники: Підшипники валу зазнають значних навантажень при високих швидкостях обертання та великих потужностях, що може призвести до їх швидкого зношування. Використовуються спеціальні мастильні системи для зниження тертя і забезпечення надійності роботи.

4) Віб्राції: На високих потужностях вібрації можуть значно зрости, особливо якщо турбіна чи ротор мають мінімальний дисбаланс. Віб्राції викликають механічне зношування та можуть пошкодити конструктивні елементи генератора, тож важливо підтримувати баланс ротора і контролювати вібраційні параметри.

5) Аварійні режими: При роботі на високих потужностях критично важливо мати надійну систему аварійного вимкнення. Якщо трапляється відмова в системах збудження, охолодження чи інші неполадки, необхідно швидко зупинити генератор, щоб уникнути серйозних пошкоджень.

### **1.3.2 Проблеми експлуатації на високих потужностях**

1) Знос ізоляції: Постійна робота на високих потужностях призводить до термічної деградації ізоляційних матеріалів. Це може спричинити короткі замикання у статорних обмотках і потребує регулярного огляду та заміни ізоляції.

2) Електричні розряди і корона: При високій напрузі можуть виникати коронні розряди, які прискорюють деградацію ізоляції і викликають додаткові електромагнітні втрати. Це явище характерне для великих генераторів і потребує якісної ізоляції та контролю рівня вологості всередині корпусу.

3) Складнощі з синхронізацією: Включення великого генератора в мережу на високій потужності вимагає точного налаштування, щоб уникнути перепадів напруги чи частоти. Неправильна синхронізація може викликати струмові удари, які негативно впливають на мережу та сам генератор.

4) Проблеми з охолодженням: Недостатня ефективність системи охолодження може призвести до перегріву, особливо при високих навантаженнях. Це вимагає регулярного технічного обслуговування систем охолодження, таких як перевірка насосів, очищення фільтрів та контроль температури.

5) Фінансові витрати на обслуговування: Підтримка гідрогенератора на високих потужностях пов'язана зі значними витратами на обслуговування. Часто необхідно залучати висококваліфікованих спеціалістів для діагностики та ремонту обладнання, а також регулярно оновлювати систему контролю і моніторингу.

6) Ризик кавітації: На високих швидкостях обертання може виникати кавітація у турбіні — утворення і руйнування бульбашок, що призводить до ерозії лопатей турбіни. Це знижує ефективність генератора та збільшує витрати на технічне обслуговування.

### **1.3.3 Заходи для подолання проблем**

1) Регулярний моніторинг стану генератора: Використання сучасних систем моніторингу для вимірювання вібрацій, температури, частоти та напруги. Це дозволяє вчасно виявити відхилення та попередити серйозні пошкодження.

2) Технічне обслуговування: Регулярне проведення технічного обслуговування і заміна зношених компонентів, таких як підшипники та ізоляційні матеріали.

3) Покращення систем охолодження: Впровадження більш ефективних охолоджувальних рішень, таких як рідинне охолодження або спеціальні системи циркуляції повітря, для відведення надлишкового тепла.

4) Оптимізація параметрів роботи: Використання автоматичних систем регулювання потужності і напруги для підтримання стабільної роботи при змінному навантаженні.

### **Висновки до розділу 1**

Отже, гідрогенератор на 100 МВт є високоефективними машинами, які перетворює енергію водяного потоку в електричну енергію і є ключовим елементом сучасних гідроелектростанцій, завдяки їхнім характеристикам і режимам, роботи ці генератори є ефективним рішенням для забезпечення стабільного енергопостачання бо працюють в піку добового графіку навантаження.

Загалом, гідрогенератори на 100 МВт є надійними, але для стабільної і тривалої експлуатації на високих потужностях вимагають постійного контролю та якісного обслуговування.

Гідрогенератори є явнополюсними тихохідними електричними машинами.

## **2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВт**

### **2.1 Вибір реле для різних типів захисту**

Для захисту гідрогенератора потужністю 100 МВт використовують різні типи реле, кожне з яких відповідає за виявлення конкретних аварійних ситуацій або відхилень у роботі генератора. Такий комплексний підхід гарантує надійність і безпеку обладнання. Розглянемо основні типи захисту і вибір реле для кожного з них [1, 4 , 7]:

1) Диференційний захист - виявлення внутрішніх коротких замикань у статорних обмотках, які є однією з найнебезпечніших аварійних ситуацій.

Тип реле: Диференційне струмове реле (наприклад, типу РТ-40 або аналогічні цифрові реле).

Принцип роботи: Порівнює струми на вході і виході статора. Якщо різниця перевищує допустиме значення, реле спрацьовує і вимикає генератор.

2) Захист від перевантаження - захист від надмірних струмів, що можуть спричинити перегрів обмоток і пошкодження ізоляції.

Тип реле: Теплове струмове реле або реле з обмеженням струму (наприклад, МТЗ).

Принцип роботи: Реле реагує на підвищений струм в обмотках і відключає генератор при перевищенні заданого рівня протягом певного часу.

3) Захист від замикань на землю - виявлення замикань на землю в статорних обмотках, що можуть спричинити значні пошкодження.

Тип реле: РНП або реле заземлення з визначенням струму в нейтралі.

Принцип роботи: Вимірює струм нульової послідовності; при наявності струму у нейтралі спрацьовує реле, що відключає генератор.

4) Захист від перевищення частоти (частотний захист) - Забезпечує стабільну частоту струму, що виробляється генератором.

Тип реле: Частотне реле (наприклад, РЧ-40).

Принцип роботи: Виявляє відхилення частоти від заданого значення (зазвичай 50 Гц). При перевищенні частоти реле зупиняє генератор, щоб уникнути коливань у мережі.

5) Захист від перевищення напруги - запобігання пошкодженню генератора та мережі через надмірну напругу.

Тип реле: Реле максимального контролю напруги (типу РМН або електронні реле захисту від перенапруг).

Принцип роботи: Реле контролює рівень напруги; при перевищенні заданого рівня вимикає генератор для запобігання перегріву та пошкодження ізоляції.

6) Захист від недонапруги (мінімальна напруга) - захищає генератор від зниження напруги, що може бути викликано нестабільністю в системі або несправністю генератора.

Тип реле: Реле РМН або аналоги.

Принцип роботи: Контролює напругу генератора. Якщо напруга падає нижче встановленого рівня, реле вимикає генератор.

7) Захист від асиметрії струмів (несиметрії фаз) - виявлення асиметрії фаз, яка може виникати через несправності або нерівномірне навантаження.

Тип реле: Реле фазної послідовності або асиметрії струмів (наприклад, РАФ).

Принцип роботи: Вимірює асиметрію в струмах між фазами. Якщо одна з фаз має суттєве відхилення, реле спрацьовує, що запобігає можливому пошкодженню ротора.

8) Тепловий захист обмоток - захист обмоток статора і ротора від перегріву.

Тип реле: Теплові реле з вбудованими температурними датчиками (наприклад, реле температурного захисту РТ-80).

Принцип роботи: Датчики температури, встановлені на обмотках, контролюють їх нагрівання. При перевищенні критичної температури реле відключає генератор.

9) Захист від вібрації - захист від надмірної вібрації, яка може призвести до механічних пошкоджень.

Тип реле: Вібраційне реле або датчики вібрації (вібросенсиори).

Принцип роботи: Датчики фіксують рівень вібрації. Якщо він перевищує допустимий рівень, реле вимикає генератор для запобігання пошкодженням.

10) АПВ - автоматичне відновлення роботи генератора після короточасних збоїв або приладів на вході.

Тип реле: Реле АПВ.

Принцип роботи: Після короточасного відключення через аварію реле АПВ автоматично намагається повернути генератор в робочий стан. Це зменшує ризик простою при незначних короточасних збоях.

## **2.2 Схема підключення релейного захисту до гідрогенератора**

Схема підключення релейного захисту для гідрогенератора 100 МВт включає в себе набір реле, трансформаторів струму і напруги, а також комутаційне обладнання, яке забезпечує безпечну і стабільну роботу генератора. Розглянемо загальну структуру такої схеми [8].

### **2.2.1 Основні елементи схеми релейного захисту**

1) Трансформатори струму (ТС): Встановлюються на виході обмоток генератора і перетворюють високі струми генератора в низькі струми, безпечні для релейного захисту. Зазвичай використовуються для диференційного захисту, захисту від перевантаження і асиметрії фаз.

2) Трансформатори напруги (ТН): забезпечують контроль напруги генератора, перетворюючи високу напругу генератора в нижчу, яка підходить для роботи терміналу захисту гідрогенератора, наприклад, типу REG 670. ТН також використовуються для захисту від перенапруг та від аварійного зменшення напруги.

3) Диференційне реле струму: З'єднується з трансформаторами струму на вході і виході обмоток генератора. Використовується для виявлення внутрішніх коротких замикань в обмотках статора.

4) Реле перевантаження (теплове реле): Встановлюється для контролю температури обмоток та захисту від перевищення струму. Зазвичай підключається до вихідного струму генератора через трансформатори струму.

5) Реле нульової послідовності (реле замикання на землю): Підключається до трансформатора струму в нейтралі або через трансформатори нульової послідовності, щоб фіксувати наявність струму замикання на землю.

6) Реле мінімальної та максимальної напруги: Підключаються через трансформатор напруги і вимірюють напругу генератора. Спрацьовують, якщо напруга виходить за допустимі межі.

7) Частотне реле: Отримує живлення від трансформатора напруги, контролюючи частоту виробленого змінного струму. Захищає від відхилень частоти, які можуть вплинути на стабільність роботи енергосистеми.

8) Реле асиметрії струмів: Підключається до фазних ліній генератора через трансформатори струму. Виявляє дисбаланс фазних струмів.

9) Реле температурного захисту: Підключається до термодатчиків, встановлених на обмотках статора і ротора, і відключає генератор при перевищенні допустимої температури.

10) Контактор або вимикач навантаження: Виконує роль основного комутаційного пристрою, який фізично розриває коло при спрацьовуванні релейного захисту.

### **2.2.2 Загальна схема підключення електричних апаратів до гідрогенератора**

Трансформатори струму і напруги підключаються до основних фазних проводів на виході гідрогенератора. Трансформатори струму зменшують струм, а трансформатори напруги — напругу, щоб під'єднані реле могли

працювати без пошкоджень. Релейний блок захисту розміщується окремо від основного генератора, але підключається до трансформаторів струму і напруги. Це забезпечує захист від аварійних умов на безпечній дистанції. Диференційне реле підключається між трансформаторами струму, встановленими на початку і кінці обмоток статора генератора. Якщо різниця струмів перевищує заданий поріг, реле подає сигнал на вимикач навантаження. Трансформатори струму передають сигнали на реле перевантаження і асиметрії, які розташовані в релейному блоці. Ці реле контролюють рівень струму і симетричність фаз. Реле максимальної і мінімальної напруги підключаються через трансформатори напруги і слідкують за рівнем напруги генератора. Частотне реле підключається до трансформатора напруги і контролює частоту струму, що генерується. Підключення реле замикання на землю встановлюється в нейтралі або використовує трансформатори струму нульової послідовності для виявлення замикань на землю. Всі захисні реле підключені до контактів управління вимикачем навантаження. При спрацьовуванні будь-якого з реле вимикач відключає генератор від мережі, розриваючи ланцюг. [1]

### **2.3 Розробка алгоритмів роботи для кожного виду релейного захисту**

Розробка алгоритмів роботи релейного захисту для гідрогенератора 100 МВт передбачає створення послідовних дій для кожного типу захисту, щоб ефективно реагувати на аварійні ситуації та забезпечити безперебійну роботу. Розглянемо алгоритми для основних видів релейного захисту.

- 1) Диференційний захист використовується для виявлення внутрішніх коротких замикань у статорі. Зчитує значення струму з трансформаторів струму на вході та виході обмоток статора, якщо різниця струмів перевищує встановлений поріг то спрацьовує реле, надсилається сигнал на вимикач для негайного відключення генератора, якщо ж в межах норми то моніторинг продовжується.

2) Захист від перенавантажень використовується для захисту обмоток генератора від перенагріву через надмірні струми. Контролює струм у фазах за допомогою трансформаторів струму, якщо струм перевищує заданий поріг, активується таймер (затримка для уникнення помилкових спрацьовувань) і перевищення триває довше, ніж встановлений час то реле спрацьовує, надсилаючи сигнал на вимикач для відключення генератора, якщо струм повертається до норми до закінчення таймера, таймер скидається, і контроль триває.

3) Захист від замикань на землю використовується для виявлення замикань на землю в обмотках статора. Вимірює струм нульової послідовності через трансформатори струму або нейтральну точку. Якщо струм нульової послідовності перевищує порогове значення то спрацьовує реле замикання на землю, відправляючи сигнал на вимикач для відключення генератора, якщо струм у нормі, продовжується моніторинг.

4) Захист від перевищення частоти використовується для захисту від підвищення частоти, що може вплинути на стабільність мережі. Контролює частоту на виході генератора, якщо частота перевищує допустимі межі то реле частоти активується і відправляє сигнал на систему збудження, щоб зменшити потужність генератора, якщо частота продовжує зростати, реле надсилає сигнал на вимикач для відключення генератора від мережі, якщо частота в нормі, контроль продовжується.

5) Захист від перенапруг використовується для захисту від надмірної напруги на виході генератора. Моніторє напругу за допомогою трансформатора напруги, якщо напруга перевищує встановлений поріг то активується реле перенапруги, яке надсилає сигнал на систему збудження для зменшення напруги, якщо напруга не знижується, реле подає сигнал на вимикач для відключення генератора, якщо напруга в нормі, контроль триває.

6) Захист від аварійного зменшення напруги (мінімальної напруги) використовується для захисту гідрогенератора від зниження напруги, яке може спричинити нестабільність роботи. Цей захист контролює напругу через

трансформатор напруги, якщо напруга падає нижче нормованого значення та менше уставки спрацювання захисту, то спрацьовує реле мінімальної напруги, відправляючи сигнал на вимикач для зупинки генератора, якщо напруга стабільна, продовжується нормальний режим роботи.

7) Захист від асиметрії фаз (несиметрії струмів) запобігає зношуванню та пошкодженню ротора через асиметрію фазних струмів. Контролює струм у всіх фазах, розраховує ступінь асиметрії, якщо асиметрія перевищує допустиму то спрацьовує реле асиметрії, відправляючи сигнал на вимикач для відключення генератора, при нормальних показниках робота триває.

8) Тепловий захист обмоток гідрогенератора використовується для захисту від перегріву обмоток статора і ротора. Цей захист контролює температуру обмоток за допомогою термодатчика, якщо температура перевищує критичне значення то захист активується і подає сигнал на вимикач для зупинення гідрогенератора, якщо температура в нормі, робота гідрогенератора триває.

9) Захист від вібрації використовується від надмірних вібрацій, що можуть пошкодити механічні компоненти генератора. Контролює рівня вібрації через вібраційні датчики, якщо рівень вібрації перевищує встановлений поріг то спрацьовує реле вібрації, відправляючи сигнал на вимикач для негайного відключення генератора, якщо рівень вібрації у межах норми, продовжується моніторинг.

10) АПВ використовується для спроби автоматично відновити роботу після короткочасного відключення. Після відключення генератора через аварійне спрацювання реле запускається таймер затримки для АПВ, якщо причина відключення була усунута і параметри повернулися в норму то система автоматично вмикає генератор знову, якщо проблема не вирішена, автоматичне включення не виконується.

11) Захист ротора гідрогенератора та від замкнення в одній точці.

## **2.4 Моделювання роботи релейного захисту під час аварійних ситуацій та оцінка надійності**

Моделювання роботи релейного захисту гідрогенератора 100 МВт під час аварійних ситуацій — це важлива складова для оцінки його надійності і передбачення можливих проблем. Таке моделювання включає симуляцію різних аварійних сценаріїв, перевірку адекватності роботи захисних реле, а також оцінку загальної надійності гідрогенератора з урахуванням часу спрацьовування захисту, ймовірності відмов реле та резервування захистів.

Основні етапи моделювання релейного захисту [9-11]:

1) Вибір аварійних сценаріїв: Важливо розглянути типові аварійні ситуації, такі як короткі замикання в обмотках статора, замикання на землю, перевантаження, асиметрія фаз, перегрів обмоток, підвищення або зниження напруги, частоти тощо.

2) Параметризація моделі: Всі вхідні параметри, такі як номінальна потужність, напруга, частота, порогові значення спрацьовування реле, затримки спрацьовування і відновлення, вводяться в модель.

3) Моделювання роботи реле: Кожен вид релейного захисту моделюється окремо із заданими пороговими значеннями і логікою роботи. Наприклад, для диференційного захисту задається поріг різниці струмів, який вважається аварійним. Для захисту від перенапруги моделюється поріг напруги і тривалість перевищення, за якої спрацьовує захист.

4) Симуляція аварійних ситуацій: Кожна аварійна ситуація вводиться в модель по черзі:

1. Коротке замикання в обмотках (диференційний захист).
2. Перевантаження (реле перевантаження).
3. Асиметрія фаз (реле асиметрії).
4. Підвищення/зниження частоти (частотний захист).
5. Перегрів обмоток (тепловий захист).

Кожна з цих аварій активує відповідне реле, і фіксується час спрацьовування та коректність роботи.

5) Оцінка часу реакції: Важливо перевірити, чи спрацьовує РЗ у встановлені межі часу. Наприклад, затримка в роботі реле може призвести до серйозних пошкоджень генератора. Модель аналізує, як швидко кожне реле реагує на аварію, і порівнює час спрацьовування з нормативними значеннями.

6) Перевірка взаємодії реле: Деякі аварійні ситуації можуть активувати кілька реле одночасно, наприклад, перевантаження може супроводжуватися підвищенням температури обмоток. Моделювання дозволяє перевірити, чи узгоджено працюють реле і чи не виникає конфліктів між захистами.

7) Оцінка надійності: За результатами моделювання обчислюється ймовірність відмов релейного захисту. Це включає такі показники:

8) Ймовірність відмови реле: Виходячи зі статистики надійності реле, можна розрахувати ймовірність їх неспрацювання в аварійній ситуації.

9) Середній час безвідмовної роботи: Враховуючи інтенсивність відмов реле і їхню надійність, можна оцінити середній час, протягом якого гідрогенератор може працювати без аварій.

10) Резервування: Наявність резервних захистів підвищує загальну надійність системи, оскільки при відмові одного реле аварія буде виявлена іншими захистами.

## **Висновки до розділу 2**

1. Розробка алгоритмів роботи релейного захисту для гідрогенератора 100 МВт передбачає створення послідовних дій для кожного типу захисту, щоб ефективно реагувати на аварійні ситуації та забезпечити безперебійну роботу.

2. Моделювання роботи релейного захисту гідрогенератора 100 МВт під час аварійних ситуацій — це важлива складова для оцінки його надійності і передбачення можливих проблем

3. Релейний блок захисту розміщується окремо від основного генератора, але підключається до трансформаторів струму і напруги.

### **3 ВИДИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ І ЇХ ВПЛИВ НА НАДІЙНІСТЬ**

#### **3.1 Аналіз типових аварійних режимів, що можуть виникати при роботі гідрогенератора**

Аварійні режими під час роботи гідрогенератора потужністю 100 МВт можуть спричинити серйозні пошкодження генератора та перебої в електропостачанні споживачів, а тому потребують швидкого реагування захистів гідрогенератора на такі режими. Ось основні типи аварійних режимів, що можуть виникати під час роботи такого гідрогенератора. [12, 13]

##### **1) Коротке замикання в обмотках статора**

Причини: Пошкодження ізоляції обмоток, перегрів або механічні дефекти можуть призвести до короткого замикання в обмотках статора.

Ознаки: Різке збільшення струму в обмотках, що перевищує номінальні значення.

Наслідки: Може викликати серйозні пошкодження генератора через перегрів і згорання обмоток.

Захист: Диференційний захист, який порівнює струми на вході та виході статора і спрацьовує при значних розбіжностях, швидко відключає генератор від мережі.

##### **2) Замикання на землю**

Причини: Порушення ізоляції в обмотках або проводці, що з'єднує генератор із системою заземлення.

Ознаки: Поява струму нульової послідовності, що є свідченням замикання фази на землю.

Наслідки: Може призвести до підвищеного нагрівання обмоток, пошкодження ізоляції та виникнення небезпеки для персоналу.

Захист: Захист від замикання на землю за допомогою реле нульової послідовності, яке контролює струм у нейтралі або через трансформатор нульової послідовності.

### 3) Перевантаження генератора

Причини: Надмірне навантаження, обумовлене зростанням споживання енергії або збоєм у системі регулювання потужності.

Ознаки: Підвищений струм у фазах, що перевищує номінальні значення протягом тривалого часу.

Наслідки: Теплове пошкодження обмоток, що може призвести до втрати ізоляції і зниження ресурсу генератора.

Захист: Тепловий захист і реле перевантаження, які вимикають генератор при досягненні критичного рівня струму.

### 4) Асиметрія фаз (дисбаланс струмів у фазах)

Причини: Нерівномірне навантаження на фази, відмови в одній із фаз, обрив або дефекти фазного проводу.

Ознаки: Нерівномірні значення струмів у фазах, що призводить до дисбалансу та появи додаткових навантажень на ротор.

Наслідки: Може викликати надмірні вібрації і перегрівання ротора, що призводить до зносу підшипників і збільшення механічних навантажень.

Захист: Реле асиметрії фаз або реле дисбалансу струмів, яке контролює симетрію фаз і спрацьовує при виявленні значного дисбалансу.

### 5) Перевищення напруги на виході генератора

Причини: Некоректна робота системи збудження, проблеми з регулятором напруги або швидке зменшення навантаження.

Ознаки: Напруга перевищує номінальні значення, що може викликати перенапругу в електромережі.

Наслідки: Може призвести до пошкодження ізоляції, перегріву обладнання та виникнення аварій у мережі.

Захист: Реле максимальної напруги, яке контролює рівень напруги і вимикає генератор при перевищенні допустимого порогу.

### 6) Недонапруга (зниження напруги на виході генератора)

Причини: Зниження потужності через зменшення водяного потоку або проблеми в системі збудження.

Ознаки: Напруга на виході генератора нижча від номінального рівня.

Наслідки: Може призвести до нестабільної роботи обладнання і навіть до аварійних зупинок.

Захист: Реле мінімальної напруги, яке вимикає генератор при значному зниженні напруги нижче допустимого рівня.

#### 7) Підвищення або зниження частоти

Причини: Зміна швидкості обертання ротора через нестабільний потік води, помилки в системі регулювання або раптові зміни навантаження.

Ознаки: Частота струму на виході генератора відхиляється від стандартного значення (наприклад, 50 Гц).

Наслідки: Впливає на роботу обладнання, що підключене до мережі, викликаючи дисбаланс і нестабільність.

Захист: Частотне реле, яке контролює рівень частоти і спрацьовує при значних відхиленнях від норми.

#### 8) Перегрів обмоток статора або ротора

Причини: Перевантаження генератора, недостатня ефективність системи охолодження, високий рівень вібрацій.

Ознаки: Підвищення температури обмоток, що перевищує допустимий рівень.

Наслідки: Прискорена деградація ізоляції, можливе коротке замикання і вихід генератора з ладу.

Захист: Тепловий захист обмоток, який активується при досягненні критичної температури і вимикає генератор.

#### 9) Кавітація у турбіні

Причини: Виникнення порожнин (бульбашок) у воді при високій швидкості потоку, що викликає ерозію лопатей турбіни.

Ознаки: Зниження ефективності роботи турбіни, шум, вібрації.

Наслідки: Зношення лопатей, зниження ефективності генерації і можливі пошкодження механічної частини турбіни.

Захист: Вібраційні датчики та додаткові системи моніторингу тиску і потоку води, які сигналізують про аномалії.

#### 10) Надмірна вібрація

Причини: Дисбаланс ротора, пошкодження підшипників, асиметрія навантаження або кавітація.

Ознаки: Підвищений рівень вібрації, що перевищує допустимі межі.

Наслідки: Прискорене зношення підшипників, пошкодження конструкції і додаткове навантаження на вал.

Захист: Вібраційний захист, що контролює рівень вібрації, а також автоматично відключає генератор при перевищенні допустимих значень.

### **3.2 Причини та наслідки коротких замикань, перевантажень, витоків струму**

Причинами коротких замикань, перевантажень і витоків струму в гідрогенераторах 100 МВт являється багато факторів.

#### 1) Для коротких замикань причинами являються:

- Зношення ізоляції обмоток статора чи ротора через вібрацію, старіння матеріалів або високі температури;
- Потрапляння вологи у вузли генератора;
- Пошкодження від сторонніх предметів, наприклад, частинок металу чи пилу;
- Неправильна експлуатація чи прорахунки під час ремонту.

#### Наслідки:

- Високий тепловий вплив, який може спричинити подальші пошкодження ізоляції;
- Виникнення дугових розрядів, що загрожують цілісності обмоток і корпусу генератора;
- Аварійний вихід з ладу генератора і необхідність дорогого ремонту.

#### 2) Для перевантаження причинами являються:

- Надмірне навантаження на генератор через підключення до мережі більшого обсягу споживачів, ніж розраховано;
- Помилки у регулюванні напруги чи частоти роботи генератора;
- Несправності у системах охолодження, що знижують ефективність роботи.

Наслідки:

- Перегрів генератора і пошкодження ізоляції;
- Зниження ресурсу генератора або його аварійний вихід з ладу;
- Можливість виходу з ладу інших компонентів системи.

3) Для витоків струму причинами являються:

- Дефекти ізоляції через старіння, механічні пошкодження або вологість;
- Накопичення бруду та конденсату в обмотках або на корпусі генератора;
- Погана якість ізоляційних матеріалів чи їх неправильне встановлення.

Наслідки:

- Нагрівання ділянок із витокм струму, що може спричинити подальші короткі замикання;
- Ризик ураження електричним струмом персоналу;
- Зниження ефективності генератора через втрати енергії.

### **3.3 Негативний вплив аварійних режимів на роботу гідрогенераторів та обладнання електростанції**

Аварійні режими, такі як короткі замикання, перевантаження, витоки струму та інші порушення нормальної роботи гідрогенераторів, можуть суттєво вплинути на їхню роботу та на роботу пов'язаного обладнання електростанції.

1) Перегрів обмоток:

При перевантаженнях або коротких замиканнях відбувається значне виділення тепла. Це може пошкодити ізоляцію обмоток статора та ротора, знижуючи їхній ресурс або спричиняючи повний вихід з ладу.

## 2) Механічні пошкодження:

Потужні електромагнітні сили, які виникають під час короткого замикання, можуть спричинити деформацію або розрив обмоток.

## 3) Зношення підшипників:

Аварійні режими, особливо пов'язані з вібрацією, викликають надмірне навантаження на підшипники, що знижує їхній термін служби.

## 4) Дугові розряди:

Порушення ізоляції може призвести до дугових розрядів, які пошкоджують струмопровідні елементи.

### 1) Силові трансформатори:

Короткі замикання та перевантаження генератора можуть викликати перенапруги в мережі, що пошкоджують обмотки трансформаторів.

### 2) Розподільчі пристрої:

Аварійні струми можуть зруйнувати контакти вимикачів, роз'єднувачів та пошкодити струмопроводи.

### 3) Система релейного захисту:

Часті аварійні ситуації можуть викликати ненормальну роботу релейного захисту, призводячи до хибних спрацьовувань або пошкодження захисних пристроїв.

### 4) Система охолодження:

Аварійні режими можуть створити додаткове теплове навантаження на систему охолодження, що призводить до її перегріву або несправності.

### 1) Зниження стабільності електромережі:

Аварійні режими гідрогенератора викликають коливання напруги та частоти в мережі, що впливає на якість електроенергії.

### 2) Зупинка виробництва:

У разі серйозних пошкоджень генератора електростанція може втратити значну частину своєї потужності, що порушує енергопостачання.

### 3) Підвищення експлуатаційних витрат:

Аварії призводять до позапланових ремонтів, витрат на заміну деталей та втрати прибутку через зупинку генерації.

#### 4) Екологічні ризики:

Якщо аварія супроводжується витоком масла або іншими пошкодженнями допоміжного обладнання, можливе забруднення навколишнього середовища.

### 3.4 Сучасні мікропроцесорні захисти гідрогенераторів

Розглянемо сучасний термінал захисту гідрогенератора Дністровської ГАЕС виробництва фірми ABB типу REG670, який використовується для захисту, керування та моніторингу гідрогенераторів і генераторно-трансформаторних блоків від відносно невеликих агрегатів до найбільших генераторних блоків. IED має повну бібліотеку функцій, яка відповідає вимогам для більшості програм генератора. Велика кількість доступних аналогових входів дозволяє разом із великою функціональною бібліотекою інтегрувати багато функцій в одному IED. У типових додатках два блоки IED можуть забезпечити повну функціональність, а також забезпечуючи високий ступінь резервування. REG670 також можна використовувати для захисту та керування шунтуючими реакторами [13-16].

В цей термінал включено захист статора від замикань на землю, як традиційний 95%, так і 100% інжекційний і 3-ї гармоніки. Коли використовується захист на основі інжекції, 100% обмотки статора машини, включаючи зіркову точку, захищено в усіх режимах роботи. 100% захист статора від замикання на землю на основі 3-ї гармоніки використовує принцип диференціальної напруги 3-ї гармоніки. 100% захист статора від замикання на землю на основі інжекції може працювати навіть тоді, коли машина зупиняється. Перевірені алгоритми ковзання полюса, недозбудження, замикання на землю ротора, захисту від струму зворотної послідовності тощо включені в IED

Диференціальний захист генератора реалізований в терміналі REG670 адаптований для застосування в якості захисту, наприклад, на Дністровській ГАЕС, де враховуються такі фактори, як довгі постійні часу та вимоги до короткого часу відключення.

Оскільки багато функцій захисту можна використовувати як кілька екземплярів, то є можливості захистити більше ніж один об'єкт в одному IED. Можна мати захист для допоміжного силового трансформатора, інтегрованого в те саме IED, що має основний захист для генератора. Таким чином, ця концепція забезпечує дуже економічні рішення.

REG670 також забезпечує цінні можливості моніторингу, оскільки багато значень процесу можна передавати на НМІ оператора.

Широка гнучкість застосування робить цей продукт чудовим вибором як для нових установок, так і для реконструкції існуючих електростанцій.

Пристрій захисту генератора SIPROTEC 7UM85 розроблений спеціально для захисту генераторів і силових агрегатів. Він містить усі необхідні основні функції захисту та велику кількість інших функцій захисту та контролю. Завдяки модульній структурі, гнучкості та високопродуктивному інструменту проектування DIGSI 5, SIPROTEC 7UM85 пропонує орієнтовані на майбутнє рішення для захисту, керування, автоматизації, моніторингу та якості електроенергії - Basic. Для двигунів у вибухонебезпечних середовищах SIPROTEC 7UM85 також доступний із сертифікатом EN 60079-14 або VDE 0165.

Гнучкість регульованої та розширюваної структури кількості VO в рамках модульної системи SIPROTEC 5; Можуть бути додані модулі розширення 1/6, доступні з великим або маленьким дисплеєм або без дисплея.

Захист силових агрегатів одним пристроєм на групу захисту. У варіанті генераторного трансформатора 7UM85 реалізує захист як генератора, так і трансформатора.

У складніших енергоблоках (з'єднання блоку з генераторним вимикачем і декількома допоміжними трансформаторами) використовуються додаткові

пристрої SIPROTEC 5, наприклад, 7UT8x, 75182 або 75J85 і 7SA, SD, SL86, на верхній стороні напруги генераторний трансформатор.

Використання функцій захисту двигуна та гідрогенератора (наприклад, захист від недозбудження) для захисту синхронних двигунів.

### **Висновки до розділу 3**

Аварійні режими гідрогенератора, які виникають під час його експлуатації: короткі замкнення обмотки статора, замкнення на землю в одній точці обмотки ротора, коливання напруги та частоти та інші вимагають спрацювання захисту та відключення гідрогенератора.

Сучасні термінали захисту гідрогенераторів, які використовуються для захисту, керування та моніторингу гідрогенераторів і генераторно-трансформаторних блоків від відносно невеликих агрегатів до найбільших генераторних блоків. IED має повну бібліотеку функцій, які відповідають вимогам для більшості програм захисту генератора.

Велика кількість доступних аналогових входів в мікропроцесорному терміналі захисту гідрогенератора дозволяє разом із великою функціональною бібліотекою інтегрувати багато функцій в одному терміналі (в одному IED).

## **4 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВт**

### **4.1 Методи оцінки надійності релейного захисту**

Методи оцінки надійності РЗ спрямовані на аналіз ефективності роботи системи захисту енергетичного обладнання в різних умовах. Основними підходами до оцінки надійності є [1, 4 14]:

1) Аналіз імовірності відмови - цей метод базується на статистичному аналізі роботи релейних пристроїв;

- Частота відмов: аналізується кількість відмов на одиницю часу;
- Імовірність безвідмовної роботи: визначає, як довго система може працювати без збоїв;
- Імовірність помилкової роботи: оцінює ризик неправильного спрацювання релейного захисту;

2) Функціональний аналіз - вивчається, чи здатна система виконувати свої функції при різних видах коротких замикань або інших аварій.

- Час реакції: перевіряється швидкість спрацювання;
- Селективність: чи захист працює тільки на певну зону;
- Чутливість: здатність реагувати на невеликі відхилення параметрів;

3) Метод моделювання - створюються математичні або програмні моделі роботи РЗ.

- Моделювання за допомогою спеціалізованого ПЗ: аналіз сценаріїв аварій;
- Монте-Карло: імовірнісний підхід для оцінки різних сценаріїв роботи;
- Інженерне моделювання: перевірка ефективності захисту при реальних параметрах.

4) Статистичний метод - аналізуються дані з експлуатації.

- Дані про реальні відмови, спрацювання або неспрацювання захисту;
- Оцінка середнього часу відновлення після відмов.

5) Метод дерева відмов - цей метод дозволяє виявити критичні елементи системи захисту, які впливають на загальну надійність.

- Використовуються графічні моделі, щоб виявити всі можливі сценарії відмов.

) Експертна оцінка - залучаються спеціалісти для оцінки ефективності налаштувань і функціонування РЗ. Використовуються такі інструменти, як анкети, інтерв'ю, а також порівняння з передовими практиками.

7) Комплексний підхід - поєднання кількох методів для забезпечення всебічного аналізу. Це дає змогу оцінити як технічну, так і організаційну надійність системи релейного захисту.

#### **4.2 Аналіз ефективності впроваджених заходів**

Аналіз ефективності впроваджених заходів для релейного захисту (РЗ) необхідний для оцінки того, наскільки модернізація чи оптимізація захисту підвищила його надійність, чутливість і селективність. Він проводиться з урахуванням кількісних і якісних показників, а також із використанням спеціалізованих інструментів.

Основні етапи аналізу:

1) Постановка цілей аналізу:

- Визначення очікуваних результатів від впроваджених заходів (наприклад, зниження частоти відмов, зменшення часу відновлення);

- Встановлення ключових показників ефективності.

2) Збір і аналіз даних до і після впровадження:

- Статистика відмов: порівняння кількості відмов системи РЗ до і після змін;

- Час спрацювання: аналіз зменшення часу реакції на аварію;

- Селективність і чутливість: перевірка, чи відповідають параметри нових налаштувань вимогам;

- Економічні показники: оцінка зменшення витрат, пов'язаних із простоем чи пошкодженням обладнання.

### 3) Моделювання роботи системи:

- Використання програмних комплексів (ETAP, DIgSILENT PowerFactory) для моделювання роботи релейного захисту в аварійних ситуаціях;
- Проведення сценарного аналізу для оцінки поведінки системи при різних видах коротких замикань і навантажень.

### 4) Оцінка відповідності стандартам:

- Перевірка системи на відповідність міжнародним і національним стандартам (ІЕС 60255, ГОСТ Р);
- Аналіз адаптації РЗ до змін в енергосистемі (зміна топології мережі, впровадження відновлюваних джерел енергії).

### 5) Оцінка функціональних властивостей:

- Діагностика алгоритмів захисту: перевірка на правильність обробки даних;
- Випробування обладнання: тестування релейного захисту на реальних або симуляційних установках.

### 6. Економічний аналіз:

- Аналіз рентабельності впроваджених заходів, оцінка вартості модернізації щодо отриманих результатів (зменшення аварій, зниження втрат енергії);
- Розрахунок терміну окупності.

### 7. Оцінка надійності:

- Аналіз імовірності безвідмовної роботи за допомогою статистичних методів;
- Використання методу Монте-Карло або аналізу дерева відмов для визначення слабких місць у системі.

### 8. Звітність і висновки:

- Формування звіту з детальними показниками роботи РЗ до і після заходів;
- Рекомендації для подальшого вдосконалення системи.

### 4.3 Пропозиції щодо підвищення стійкості релейного захисту

Підвищення стійкості системи релейного захисту (РЗ) є важливим завданням для забезпечення надійності енергосистеми. Ось кілька пропозицій щодо її покращення:

#### 1) Модернізація обладнання:

- Перехід на цифрові релейні захисти (ЦРЗ): Використання сучасних мікропроцесорних пристроїв, які забезпечують більшу точність, багатофункціональність і можливість дистанційного моніторингу;
- Резервування систем захисту: Впровадження дублюючих схем релейного захисту для уникнення збоїв через вихід з ладу основного захисту.

#### 2) Впровадження новітніх технологій:

- Використання технологій самодіагностики: Системи, які постійно контролюють справність компонентів РЗ;
- Мережеві протоколи IEC 61850: Для швидкого обміну даними між пристроями РЗ та автоматизації підстанцій.

#### 3) Поліпшення алгоритмів захисту:

- Адаптивний РЗ: Налаштування пристроїв під реальні умови роботи мережі (зміна конфігурації, навантаження тощо);
- Впровадження методів машинного навчання: Для прогнозування можливих відмов і підвищення точності виявлення несправностей.

#### 4) Підвищення захищеності від кібератак:

- Забезпечення кібербезпеки систем захисту, включаючи шифрування даних, автентифікацію пристроїв і сегментування мережі.

#### 5) Розвиток персоналу:

- Постійне навчання і сертифікація інженерів, що обслуговують системи РЗ;
- Проведення регулярних тренувань і перевірок знань роботи з новими пристроями.

#### 6) Моніторинг і аналіз:

- Впровадження систем онлайн-моніторингу стану енергомережі;

- Використання аналітичних інструментів для визначення слабких місць і профілактичної заміни обладнання.

7) Оптимізація схем енергопостачання:

- Розробка нових схем енергопостачання для зменшення навантаження на окремі компоненти системи;
- Застосування секціонування мереж для зменшення впливу аварій на великі зони.

**Висновки до розділу 4**

Аналіз ефективності впроваджених заходів для релейного захисту необхідний для оцінки того, наскільки модернізація чи оптимізація захисту підвищила його надійність, чутливість і селективність.

Підвищення стійкості системи релейного захисту передбачає:

модернізацію захисту, перехід на цифрові релейні захисти, використання сучасних мікропроцесорних пристроїв, які забезпечують більшу точність, багатофункціональність і можливість дистанційного моніторингу, резервування систем захисту, впровадження дублюючих схем релейного захисту для уникнення збоїв через вихід з ладу основного захисту, впровадження новітніх технологій РЗ, використання технологій самодіагностики, поліпшення алгоритмів захисту та ін.

## 5 ПРОЄКТУВАННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ БЛОКУ ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР ТЕС З ГІДРОГЕНЕРАТОРОМ ТИПУ СВ-1500/170-96

Параметри гідрогенератора СВ-1500/170-96 90 (СВ-вертикальний синхронний генератор).

$S_H = 117.65$  МВА;  $P_H = 100$  МВт;  $U_H = 13,8$  кВ,  $I_H = 4,92$  кА;  $\cos \varphi = 0,85$ ,  $n_{об} = 62,5$  об/хв,  $OK3 = 1,75$ ,  $x_d'' = 0,21$ ,  $x_d' = 0,21$ ,  $x_d' = 0,29$ ,  $x_d = 0,65$ ,  $x_q'' = 0,23$ ,  $x_q = 0,59$ ,  $x_q' = 0,23$ ,  $x_q = 0,59$ ,  $x_2 = 0,22$ ,  $x_0 = 0,1$ ,  $T_{d0} = 5,3$  сек,  $I_{f\text{ ном}} = 1795$  А,  $I_{f\text{ ном}} / I_f = 1,75$ ,  $U_{f\text{ ном}} = 430$  В,  $K_f = 2,2$ ,  $\eta = 97,5$  %,  $j = 80000$  Т·м<sup>2</sup>·0,25.

Параметри трансформатора ТДЦ-125000/242-13,8:  $S_H = 125$  МВА;  $U_{BH} = 242$  кВ;  $U_{HH} = 13,8$  кВ;  $P_x = 120$  кВт,  $P_k = 380$  кВт,  $u_k = 11$  %,  $I_x = 0,25$  %.

### 5.1 Захист трансформаторів та автотрансформаторів

Основні види пошкоджень та особливі режими роботи трансформаторів і автотрансформаторів [4]

Основними видами пошкоджень трансформаторів і автотрансформаторів є:

- міжфазні к.з. в обмотках і на виводах трансформаторів і автотрансформаторів;
- однофазні та двофазні к.з. на землю (для трансформаторів з ефективно заземленою нейтраллю та автотрансформаторів) в обмотках і на виводах; – однофазні замикання на землю (для трансформаторів з ізолюваною нейтраллю);
- виткові замикання;
- "пожежа" магнітопроводу.

За міжфазних к.з. в обмотках та на виводах, а також за однофазних і двофазних к.з. на землю в мережах з ефективно заземленою нейтраллю істотно зростає рівень струмів в обмотках трансформатора, що зумовлює їх

перегрівання і, як наслідок, – виткові замикання, розклад оливи (для оливних трансформаторів) та пожежу трансформатора. Ці пошкодження є дуже небезпечними для трансформатора. Тому захисти від таких пошкоджень повинні діяти без витримки часу на вимикання трансформатора від мережі та увімкнення системи пожежогасіння. У такому разі трансформатор вимикають зі всіх сторін, щоб запобігти живленню місця к.з. не тільки від джерела живлення, а й від увімкнутих двигунів навантаження.

За виткових замикань обмотки трансформатора в короткозамкнених витках виникають струми, що багатократно перевищують його номінальний струм, хоча за такого режиму фазні струми трансформатора можуть бути меншими від номінального. Тому захист від таких пошкоджень, як і в попередньому випадку, також повинен діяти без витримки часу на вимикання трансформатора від мережі.

За однофазних замикань на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю рівень струмів є порівняно незначним і безпосередньо не загрожує роботі трансформатора. Але за такого режиму зростає напруга непошкоджених фаз відносно землі, яка, в разі металічного замикання на землю, збільшується в 3 разів. За дугових замикань і ферорезонансних явищ, як показує досвід експлуатації, напруга непошкоджених фаз відносно землі може сягати чотирикратного рівня. Спеціальний захист від таких пошкоджень на трансформаторах не встановлюють, але на лініях, що живлять трансформатори мереж з ізолюваною нейтраллю, встановлюють захист від однофазних замикань на землю.

"Пожежа" сталі трансформатора виникає за пошкодження ізоляції між пластинами магнітопроводу. Тоді виникають замикання між пластинами і в них зростають вихрові струми (струми Фуко). Виникає місцеве перегрівання, що супроводжується розкладом трансформаторної оливи, виділенням газу. Захист від таких пошкоджень повинен діяти на сигнал. За значних пошкоджень ізоляції між пластинами, що супроводжуються бурхливим

газовиділенням розкладеної оливи, захист повинен без витримки часу вимикати трансформатор від мережі.

До особливих режимів роботи трансформатора зараховують режими надструмів в обмотках трансформатора (надструми менші від струмів міжфазних к.з., але більші від номінальних струмів).

Причинами виникнення надструмів можуть бути:

- зовнішні к.з.;
- хитання в системі;
- перевантаження;
- перезбудження.

За зовнішніх к.з. (к.з. на шинах, к.з. на приєднаннях, що живляться від трансформатора) значно зростають струми в обмотках трансформатора, що призводить до їх перегрівання, передчасного старіння ізоляції, та, як наслідок, до її пробою. Тому на трансформаторах передбачають спеціальний захист від надструмів зовнішніх к.з., що діє на вимикання пошкодження з витримкою часу. У трьохобмоткових трансформаторах захист діє на вимкнення вимикача тієї обмотки, від якої безпосередньо живиться пошкоджений об'єкт.

Хитання можуть виникати між частинами системи, об'єднаними через трансформаторний зв'язок. У такому разі перетоки зрівнювальних струмів протікають через трансформатор і нагрівають його. Зрівнювальні струми можуть бути дуже великими (навіть більшими від струмів к.з.), тому такий режим є небезпечним для трансформатора.

За перевантажень рівень струмів є істотно меншим, ніж за зовнішніх к.з. Перевантаження можуть виникати, наприклад, за під'єднання до трансформатора додаткового навантаження пристроями АВР після вимикання паралельно працюючого трансформатора тощо.

Роботу, за незначних перевантажень, оливних трансформаторів допускають упродовж часу, що залежить від кратності перевантаження (табл. 1).

Таблиця 5.1 – Допустимі перевантаження трансформаторів

| Кратність перевантаження<br>$I_T/I_{T.ном}$ | 1.3 | 1.6 | 1.75 | 2  | 3   |
|---------------------------------------------|-----|-----|------|----|-----|
| Допустимий час<br>перевантаження, хв        | 120 | 45  | 20   | 10 | 1.5 |

Як видно з таблиці, незначні перевантаження трансформатора може ліквідувати обслуговуючий персонал підстанції. Для цього є достатньо часу. На підстанціях, де черговий персонал відсутній, довготривалі перевантаження повинні ліквідувати спеціальні пристрої автоматики, що з витримкою часу вимикають менш відповідальних споживачів.

Отже, захист від перевантажень повинен діяти на сигнал (коли є можливість розвантажити трансформатор вручну або автоматично). В інших випадках захист від перевантажень повинен діяти з витримкою часу на вимикання трансформатора від мережі.

Трансформатори великої потужності, що експлуатуються в електроенергетичних системах, мають великі розміри та масу. Ефективне використання матеріалів (трансформаторна сталь, обмоткові проводи) призвело до оптимального підвищення робочої номінальної індукції в сталі трансформатора – до  $\sim 1,65$  Тл. Подальше підвищення індукції в магнітопроводі трансформатора спричиняє значне збільшення струму намагнічення в обмотках та втрат у сталі. Тому підвищення напруги живлення трансформатора без збільшення кількості витків обмотки призводить до перезбудження трансформатора та його перегрівання. Захистити трансформатор від перезбудження складно, але застосування автоматики регулювання напруги (пристроєм РПН) забезпечує відповідний підбір витків обмотки живлення трансформатора і не допускає його перезбудження.

### 5.1.1 Захисти гідрогенератора 100 МВт

Захист гідрогенератора від зовнішніх симетричних коротких замикань

Цей захист виконує функції як дальнього резервування (за відмов захистів суміжних елементів), так і ближнього резервування (за відмов основних захистів генератора).

Для захисту від зовнішніх симетричних к.з. застосовують максимальний струмовий захист з пуском за напругою – для генераторів невеликої потужності, а дистанційний захист – для генераторів великої потужності [1].

На рис.5.1 наведена схема максимального струмового захисту з пуском за напругою.

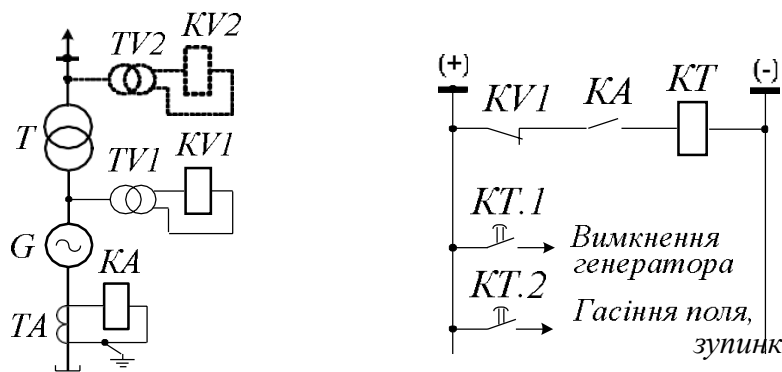


Рисунок 5.1 – Схема максимального струмового захисту з пуском за напругою

Струмовий орган – реле КА (рисунок 1) вмикають на струм однієї з фаз статора генератора зі сторони нейтралі. За такого увімкнення струмового органа зона дії захисту охоплює усю обмотку статора генератора. Реле мінімальної напруги KV1 вмикають до лінійної напруги зі сторони виводів генератора. Для підвищення ефективності дальнього резервування захист доповнюють реле мінімальної напруги KV2, яке вмикають на напругу сторони вищої напруги блочного трансформатора Т.

Захист виконують з двома витримками часу – для дальнього та ближнього резервування. За зовнішнього к.з. та неспрацювання (відмови)

захистів суміжних елементів максимальний струмовий захист генератора з пуском за напругою з меншою витримкою часу, яка визначається першою уставкою реле часу КТ.1, діє на вимкнення генератора від мережі. Якщо після вимкнення генератора вимірні органи захисту залишились в спрацьованому стані, це свідчить про пошкодження в самому генераторі та неспрацюванні основних захистів генератора. У такому разі захист з другою, більшою витримкою реле часу КТ.2 діє на гасіння поля генератора та зупинку його теплосилового обладнання.

Струм спрацювання захисту відводять від номінального струму генератора

$$I_{с.з} = \frac{k_{від}}{k_{пов}} \cdot I_{Г.ном}, \quad (5.1)$$

де  $k_{від} = 1,2$  - коефіцієнт відведення;  $k_{пов} = 0,8$  - коефіцієнт повернення, величина якого залежить від типу реле, наприклад, для реле РТ-40  $k_{пов} = 0,8$ ;  $I_{Г.ном}$  - номінальний струм генератора. Первинну напругу спрацювання вимірних органів мінімальної напруги визначають як

$$U_{с.з} = (0,5 - 0,6) \cdot U_{Г.ном}, \quad (5.2)$$

де  $U_{Г.ном}$  - номінальна напруга на виводах статора генератора.

За автономної роботи генератора на виділене навантаження зона резервування максимального струмового захисту з пуском за напругою охоплює ділянку лінії, довжиною  $\sim 75$  км. За живлення місця к.з. і від інших джерел ця зона істотно зменшується і становить 10–20 км.

Для розширення зони захисту генератора від зовнішніх симетричних к.з. доцільно встановлювати дистанційний захист. У цьому разі зона резервування захисту охоплює кілька сотень кілометрів повітряної ЛЕП.

До вимірного органу дистанційного захисту (реле мінімального опору) підводять зі сторони нейтралі генератора через трансформатори струму ТА різницю фазних струмів, наприклад,  $\dot{I}_a - \dot{I}_b$  та лінійну напругу  $\dot{U}_{ab}$  від трансформатора напруги, встановленого на лінійних виводах обмотки статора генератора.

За такого увімкнення вимірного органу захист буде чутливий до всіх видів міжфазних к.з. Схема увімкнення вимірного органу дистанційного захисту наведена на рис. 5.2.

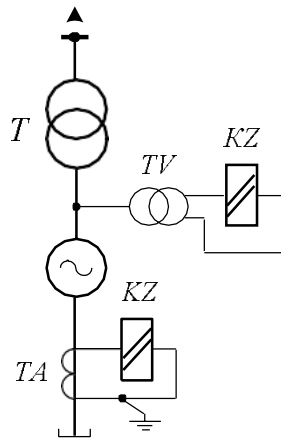


Рисунок 5.2 – Схема увімкнення вимірного органу дистанційного захисту генератора

Для потужних генераторів, які експлуатують на електричних станціях України, дистанційний захист від симетричних зовнішніх к.з. виконують, зазвичай, з застосуванням блок-реле типу КРС-2. Хоча останнім часом в експлуатації починають застосовувати цифрові захисти. У разі застосування блок-реле КРС-2, використовують одне з трьох дистанційних реле, з яких складається блок-реле. На дистанційному реле можна налаштувати характеристики – кругову (рис.5.3, а), кругову зі зміщенням в третій квадрант (рис.5.3, б) та еліптичну (рис.5.3, в).

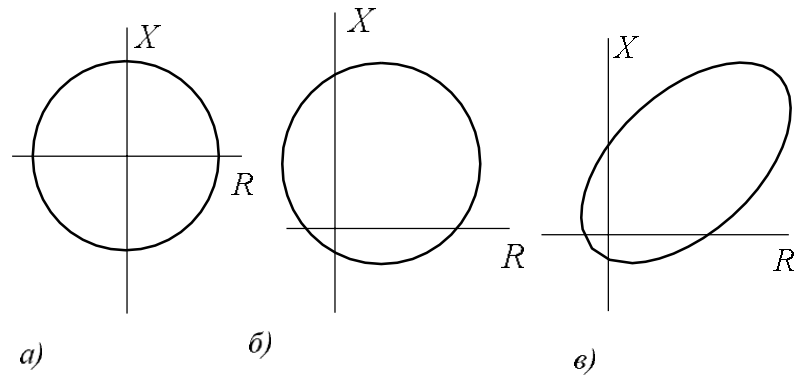


Рисунок 5.3 – Характеристики реле опору блок-реле КРС-2

Оптимальними є характеристики зі зміщенням в III квадрант (рис.3, б, в). У цьому разі захист охоплює крім зовнішньої електричної мережі і виводи генератора. Еліптична характеристика (рис.5.3, в) дає змогу відвести роботу захисту від максимального робочого режиму генератора. Опір спрацювання захисту вибирають з умови відведення від режиму максимального навантаження генератора. Для реле з круговою характеристикою опір спрацювання захисту визначають як

$$Z_{с.з.} = \frac{Z_{нав.}}{k_{від.} \cdot k_{пов.} \cdot \cos(\varphi_{м.ч.} - \varphi_{нав.})}, \quad (5.3)$$

де від  $k_{від.} = 1,2$  – коефіцієнт відведення;  $k_{пов.} = 1,05$  – коефіцієнт

повернення;  $\varphi_{м.ч.} = 80^\circ$  – кут максимальної чутливості;  $\varphi_{нав.}$  – аргумент імпедансу навантаження, що відповідає максимальному навантаженню генератора;  $Z_{нав.}$  – модуль імпедансу навантаження, який вибирають з умови короткочасного перевантаження генератора на 50%

$$Z_{нав.} = \frac{U_{Г.мін}}{\sqrt{3} \cdot I_{Г.макс}} = \frac{0,95 \cdot U_{Г.ном}}{\sqrt{3} \cdot 1,5 \cdot I_{Г.ном}} \quad (5.4)$$

де  $U_{Г.мін}$  – мінімальна напруга на виводах статора генератора;  $I_{Г.макс}$  – максимальний струм обмотки статора генератора за допустимого короткочасного перевантаження генератора. Кут навантаження  $\varphi_{нав.}$  визначають за таких міркувань. Приймають, що активна потужність

генератора до і після виникнення перевантаження не змінилась і вона була номінальною. До виникнення перевантаження активну потужність розраховують як

$$P_{Г.ном} = \sqrt{3} \cdot U_{Г.ном} \cdot I_{Г.ном} \cdot \cos\varphi_{ном.}$$

Після виникнення перевантаження –

$$P_{Г.ном} = \sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot U_{Г.ном} \cdot 1,5 \cdot I_{Г.ном} \cdot \cos\varphi_{нав.}$$

Прирівнявши ці два вирази, отримують  $\cos\varphi_{ном} = 0,95 \cdot 1,5 \cdot \cos\varphi_{нав.}$ . Звідки

$$\varphi_{нав} = \arccos\left(\frac{\cos(\varphi_{ном})}{1,425}\right).$$

Для реле з еліптичною характеристикою необхідно визначати малу та велику осі еліпса. Для визначення великої осі еліпса приймають, що генератор може бути завантажений реактивним навантаженням (у відносних одиницях), яке дорівнює  $0,8 \cdot P_{Г.ном}$ . Такому навантаженню відповідає кут  $\varphi_{нав} \approx 80^\circ$ . Тому  $\cos(\varphi_{м.ч.} - \varphi_{нав}) = \cos(80^\circ - 80^\circ) = 1$

Тоді опір, визначений за (5.3), що відповідає більшій осі еліпса, визначають як

$$Z_{с.з.макс} = \frac{Z_{нав.}}{k_{від} \cdot k_{пов}} = \frac{0,95 \cdot U_{Г.ном}}{0,8 \cdot P_{Г.ном} \cdot k_{від} \cdot k_{пов}}. \quad (5.5)$$

Співвідношення осей еліпса визначає розрахунковий коефіцієнт еліптичності

$$k_{еліп.розр} = \frac{Z_{с.з.мін}}{Z_{с.з.макс}}. \quad (5.6)$$

де  $Z_{с.з.мін}$  – модуль імпедансу, що відповідає малій осі еліпса. Коефіцієнт еліптичності задають, налаштовуючи характеристику конкретного реле. Так,

для реле блок-реле КРС-2 коефіцієнт еліптичності може становити 0,5; 0,65; 0,8. Після визначення розрахункового коефіцієнта еліптичності за (9.)  $k_{\text{еліп.розр}}$  приймають реальне значення коефіцієнта еліптичності  $k_{\text{еліп}}$  та згідно з цим значенням уточнюють значення малої осі

$$Z_{\text{с.з.мін}} = k_{\text{еліп}} \cdot Z_{\text{с.з.макс}}. \quad (5.7)$$

За виразами (5.3) – (5.7) визначають первинну уставку спрацювання дистанційного захисту. Уставку спрацювання реле визначають з врахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів струму та напруги

$$Z_{\text{с.р}} = Z_{\text{с.з}} = \frac{n_{\text{ТА}}}{n_{\text{ТВ}}} \cdot n_{\text{ТЛ}}, \quad (5.8)$$

де  $n_{\text{ТА}}, n_{\text{ТВ}}$  – коефіцієнти трансформації трансформаторів відповідно струму та напруги, до яких приєднаний вимірний орган захисту;  $n_{\text{ТЛ}}$  – коефіцієнт трансформації проміжного трансформатора струму, якщо він додатково

встановлений в струмових колах реле. За його відсутності приймають  $n_{\text{ТЛ}} = 1$ .

## 5.2 Захист генератора від несиметричних режимів

За несиметричних режимів в обмотці статора генератора протікають струми оберненої послідовності. Тому для захисту генераторів від несиметричних режимів застосовують струмовий захист, що реагує на струм оберненої послідовності. Захист діє на вимкнення генератора від мережі та переведення його на неробочий режим [1].

Для генераторів потужністю 160 МВт та більше застосовують захист типу РТФ-6М. Структурна схема захисту РТФ-6М наведена на рис.4.

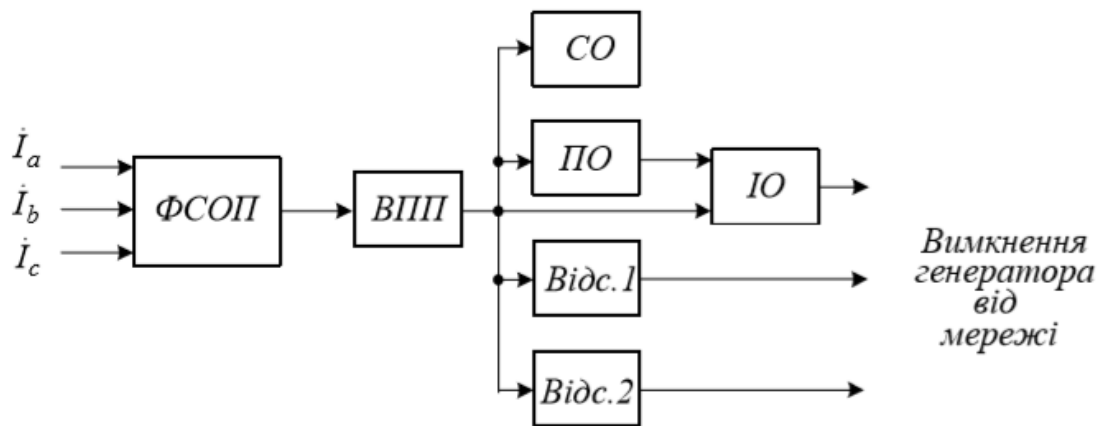


Рисунок 5.4 – Структурна схема захисту РТФ-6М

У пристрої РТФ-6М до входу фільтра струму оберненої послідовності (ФСОП) підводять фазні струми,  $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$  генератора (рис.5.4). З виходу ФСОП струм, пропорційний до струму оберненої послідовності, подається до вхідного перетворювального пристрою (ВПП), що призначений для налагодження фільтр-реле на заданий вторинний номінальний струм генератора та перетворення вхідного струму у відповідну випрямлену напругу на виході ВПП. Узгоджена та випрямлена

напруга з виходу ВПП підводиться до входів блоків логічної частини захисту.

У склад логічної частини захисту входять органи:

- пусковий орган (ПО);
- орган для запуску логічної частини (ЛЧ) пристрою;
- інтегральний орган (ІО) – для захисту генератора від перевантаження струмом зворотної послідовності, що діє на вимкнення генератора від мережі з витримкою часу, яка залежить від кратності струму оберненої послідовності. Інтегральний орган вводить в роботу пусковий орган ПО;

– відсічки (Відс.1) та (Відс.2), що є резервними захистами генератора від несиметричних зовнішніх к.з. Чутливіша ступінь захисту (Відс.1) – для дальнього резервування, менш чутлива Відс.2 – для ближнього резервування;

– сигнальний орган (СО), призначений для сигналізації несиметрії струмів статора генератора – наявності струму оберненої послідовності.

Діапазони уставок органів пристрою захисту типу РТФ-6М:

- сигнального органу  $(0,05-0,15) \cdot I_{Г.ном}$ ;
- пускового органу  $(0,08-0,24) \cdot I_{Г.ном}$ ;
- відсічки Відс.1  $(0,4-1,2) \cdot I_{Г.ном}$ ;
- відсічки Відс.2  $(0,7-1,9) \cdot I_{Г.ном}$ .

Захист обмотки статора генератора від симетричних перевантажень

Захист діє на сигнал з витримкою часу 6–9 с за наявності симетричного перевантаження обмотки статора генератора.

Для цього захисту застосовують одне реле струму, до якого підводять струм однієї фази – фази В генератора.

На електростанціях для захисту обмотки статора від перевантажень застосовують реле типу РТВК. Це реле має високий коефіцієнт повернення 0,99 в.о. Реле РТВК виконано з застосуванням напівпровідникових елементів. Особливістю цього реле є те, що воно не потребує спеціального блока живлення – до реле підводиться тільки струм від трансформатора струму. Живлення схеми реле здійснюється вторинним струмом трансформатора струму.

Первинну уставку захисту від симетричних перевантажень розраховують як

$$I_{с.з} = \frac{k_{від}}{k_{пов}} \cdot I_{Г.ном} = \frac{1,05}{0,99} \cdot I_{Г.ном} = 1,06 \cdot I_{Г.ном}. \quad (5.9)$$

де  $k_{від} = 1,05$  – коефіцієнт відведення;  $k_{від} = 0,99$  – коефіцієнт повернення реле;  $I_{Г.ном}$  – номінальний струм обмотки статора генератора.

Уставку реле визначають за виразом

$$I_{c.p} = \frac{I_{c.з}}{k_{TA}}, \quad (5.10)$$

де  $k_{TA}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора струму;  $I_{c.з}$  – первинна уставка захисту. Реле РТВК виконано на діапазон уставок 3,68-14 А.

### 5.2.1 Захист обмотки статора генератора від підвищення напруги

Цей захист запобігає пробією обмотки статора генератора від підвищення напруги під час роботи генератора на неробочому ході. Захист діє на гасіння поля генератора.

Цей захист є обов'язковим для всіх генераторів потужністю 160 МВт та більше. Принципова схема захисту наведена на рис. 5.

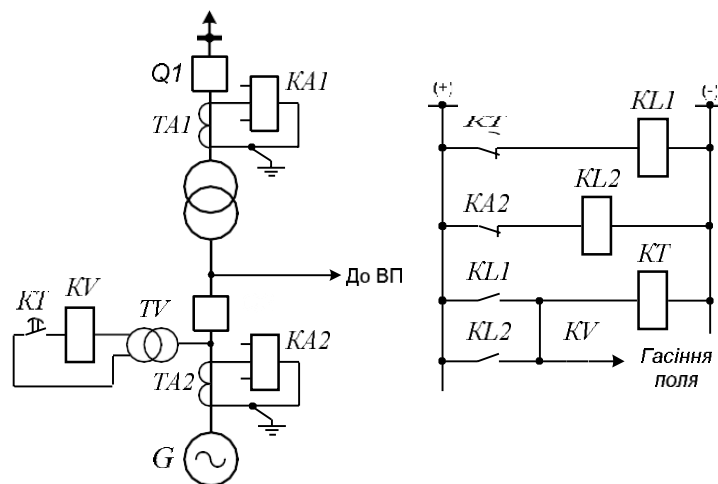


Рисунок 5.5 – Схема захисту генератора від підвищення напруги

Основний елемент захисту – реле максимальної напруги KV, яке контролює рівень міжфазної напруги на виводах генератора. Для вітчизняних генераторів використовують реле максимальної напруги типу РН-58/200.

Захист виконаний з блокуванням за струмом – він діє тільки за відсутності струму в обмотці статора генератора, тобто під час роботи генератора на неробочому ході. Контроль струму здійснюють трифазні реле струму KA1 та KA2, які також використовують у схемах пристроїв резервування відмови вимикачів (ПРВВ). Ці реле контролюють наявність струмів усіх фаз. Реле спрацьовує за відсутності струму у всіх фазах. Це

необхідно для контролю повнофазного вимкнення генератора від мережі. За неповнофазного вимкнення блочного вимикача генератор працює паралельно з системою і тоді захист не повинен працювати. Тому захист повинен спрацювати лише за відсутності струму у всіх фазах генератора.

Після вимкнення блочного вимикача Q1 (рис. 5.5) реле КА1 повернеться у вихідний стан, замкне контакт КА1 та подасть живлення до проміжного реле КЛ1. Реле КЛ1 спрацює та запустить реле часу КТ, яке з витримкою часу замкне контакт КТ в колі живлення реле максимальної напруги КВ. Коли напруга на виводах генератора буде завищена, реле максимальної напруги КВ спрацює та подасть команду на гасіння поля генератора.

Аналогічно схема працює і після вимкнення генераторного вимикача Q2. У цьому разі блокування за струмом здійснює реле струму КА2.

Витримку часу вводять для відведення захисту від хибної роботи за короткочасних підвищень напруги генератора, які можливі відразу після вимкнення генератора від мережі. Зазвичай, ця витримка часу становить 3 с.

Первинні уставки спрацювання визначають:

– для реле напруги

$$U_{с.з} = 1,2 \cdot U_{Г.ном}; \quad (5.11)$$

– для блокуючих струмових реле

$$I_{с.з} = 0,1 \cdot I_{Г.ном}; \quad (5.12)$$

де  $U_{Г.ном}$ ,  $I_{Г.ном}$  – відповідно номінальна напруга та номінальний струм генератора.

Захист генератора від замикань на землю в колах збудження

Для генераторів застосовують захист від замикань на землю в одному місці кіл збудження, що діє на сигнал та захист від замикань у двох місцях кіл збудження, що діє на аварійне вимкнення генератора від мережі.

Проте на генераторах великої потужності (500 МВт та більше) у зв'язку з тяжкими наслідками аварій за замикання в двох місцях кіл збудження, захист від замикання на землю в одному місці також діє на аварійне вимкнення генератора від мережі.

Для захисту генератора за появи землі в одному місці кіл збудження застосовують захист типу КЗР-3, в якому накладається на кола збудження змінний струм частотою 25Гц.

Принципова схема пристрою захисту типу КЗР-3 наведена на рис. 5.6.

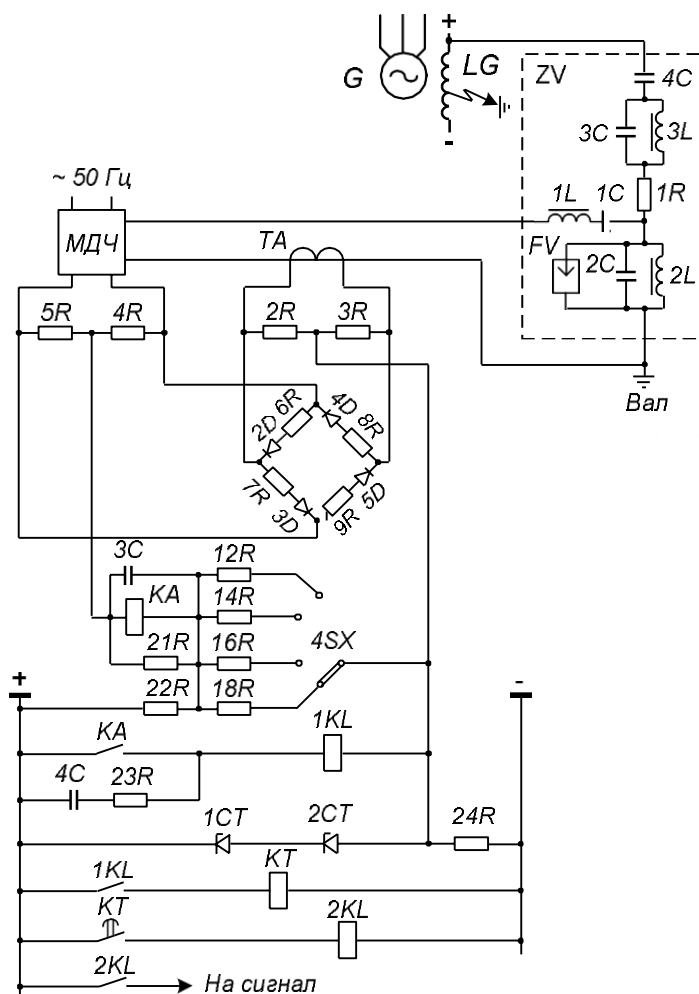


Рисунок 5.6 – Схема пристрою захисту типу КЗР-3

Джерелом живлення схеми є магнітний дільник частоти (МДЧ), що живиться від мережі 220 В власних потреб електричної станції. На виході МДЧ є дві обмотки, з яких знімається напруга частотою 25 Гц. З однієї обмотки напруга частотою 25 Гц подається в кола збудження генератора, з другої – в схему захисту. Змінну напругу частотою 25 Гц одним проводом підводять до заземленого вала генератора, а другим – до обмотки ротора через додатковий пристрій – фільтр ZV (рис.5.6). Фільтр ZV блокує протікання струмів частотою 50 Гц та більше від системи збудження, що живить обмотку збудження генератора (тиристорна чи височастотна системи збудження, крім постійного струму, генерує і височастотні складові). Це блокування здійснюють частотні L–C фільтри: 3L–3C, 2L–2C та 1L–1C. Конденсатори 4C та 1C призначені для непропускання постійного струму збудження в кола захисту – постійний струм може намагнітити магнітопровід проміжного трансформатора струму ТА. Розрядник FV захищає схему захисту від перенапруг, що можуть виникнути на вході додаткового пристрою ZV. Резистор 1R обмежує величину струму, що протікає через пристрій ZV за замикання на землю в одному місці кіл збудження.

Струм частотою 25 Гц, що протікає через обмотку збудження, має дві складові – активну та ємнісну. Коли ізоляція кіл збудження є нормальною, у струмі, переважно, є лише ємнісна складова. За порушення ізоляції виникає і активна складова. На цю активну складову реагує захист. Активну складову струму частотою 25 Гц, що протікає через обмотку збудження, виділяє симетрична кільцева фазочутлива схема пристрою захисту.

Кільцева фазочутлива схема складається з діодів 2D–5D та балансних резисторів 6R–9R, до яких подаються напруги з другої обмотки МДЧ та від обмотки ротора через трансформатор струму ТА. Навантаження фазочутливої схеми приєднане до середніх точок дільників напруги 2R–3R та 4R–5R.

Напруга, що подається від МДЧ до схеми захисту, є більшою від напруги, яка підводиться від трансформатора струму ТА. Тому напруга від МДЧ є керуючою, тобто вона тільки відкриває та закриває діоди, а струм у

колах навантаження фазочутливої схеми визначається напругою від трансформатора струму ТА, яка є пропорційна активній складовій струму ( $U \approx (2R+3R) \cdot I \cdot \cos\varphi$ ); де  $\varphi$  – кут між напругою та струмом у вторинній обмотці трансформатора струму ТА.

Напруга на виході фазочутливої схеми порівнюється з еталонною стабілізованою напругою від послідовно увімкнених стабілітронів 1СТ, 2СТ – через дільник напруги, що складається з одного з резисторів 12R, 14R, 16R чи 18R та резистора 22R. Вимірним органом захисту, що реагує на різницю цих напруг, є чутливе магнітоелектричне реле КА.

Конденсатор 3С зменшує рівень пульсації струму в обмотці реле КА, а резистор 21R, призначений для заспокоєння рамки магнітоелектричного реле під час її руху, запобігає виникненню «тремтіння» контактів реле.

Паралельно до контактів магнітоелектричного реле КА приєднана дугогасильна ланка – конденсатор 4С та резистор 23R. Ця ланка захищає контакти реле КА від підгоряння під час комутацій – за розмикання струму контактами магнітоелектричного реле КА. За рахунок магнітної енергії котушки реле 1KL, виникає дуга, що призводить до пошкодження (підгоряння) контактів. За наявності дугогасильної ланки, магнітна енергія котушки реле 1KL розсіюється через конденсатор 4С в резисторі 23R.

Уставку спрацювання реле КА задають, вмикаючи перемикачем 4SX відповідний резистор в колі подільника еталонної напруги: резистор 16R – за опору ізоляції кіл збудження 5 кОм, резистор 18R – за опору ізоляції 2,5 кОм; резистори 12R та 14R використовують за збудження генератора від електромашинного збудника.

Захист має витримку часу, щоб блокувати спрацювання захисту за перехідних процесів, що виникають у колах збудження за деяких режимів генератора – синхронізації, гасіння поля тощо. Витримку часу задають на реле часу КТ.

Напруга на контактах магнітоелектричного реле КА повинна бути в межах 70–125 В, а напруга кіл оперативного струму на електричній станції становить  $\pm 220\text{В}$ . Тому для обмеження цієї напруги в схемі передбачені стабілітрони СТ1 та СТ2, увімкнені між полюсами джерела оперативного струму через резистор 24R.

Схема (рис. 5.6) працює так. Після виникнення замикання в одному місці кіл збудження, на виході фазочутливої схеми (з ділянки напруги, утвореного резисторами 5R–4R та 2R–3R) виникає напруга, що буде більшою від еталонної напруги. Як відзначено вище, еталонна напруга знімається з ділянки напруги, утвореного резистором 22R та одним з резисторів 12R, 14R, 16R чи 18R. У результаті спрацює чутливе магнітоелектричне реле КА. Реле замкне свій контакт КА в колі проміжного реле 1KL, яке, своєю чергою, подасть живлення до обмотки реле часу КТ. Безпосередньо подавати живлення до реле часу магнітоелектричне реле КА не може, тому що має слабкі контакти. Реле КТ з заданою витримкою часу подасть живлення на проміжне реле 2KL, яке запустить кола сигналізації.

Основним недоліком захисту є те, що його чутливість залежить від ємності на землю кіл збудження. Якщо ємність кіл збудження становить  $\sim 2$  мкФ, то похибка струму спрацювання захисту може досягати 30%. Зазвичай, за роботи генератора з робочим збудником (тиристорним, високочастотним, безщітковим), ємність ланок збудження менше ніж 2 мкФ, але у разі роботи генератора з резервним електромашинним збудником, ця ємність може сягати 5 мкФ. Таку величину ємності визначають значної довжини кабелі зв'язку між електромашинним збудником та генератором. У такому разі захист КЗР-3 не застосовують.

Після спрацювання захисту типу КЗР-3, що сигналізує про наявність замикання в одному місці системи збудження, до кіл збудження даного генератора необхідно під'єднати захист від замикань на землю в двох місцях. Цей захист діє на аварійне вимкнення генератора від мережі. Для цього застосовують захист типу КЗР-2.

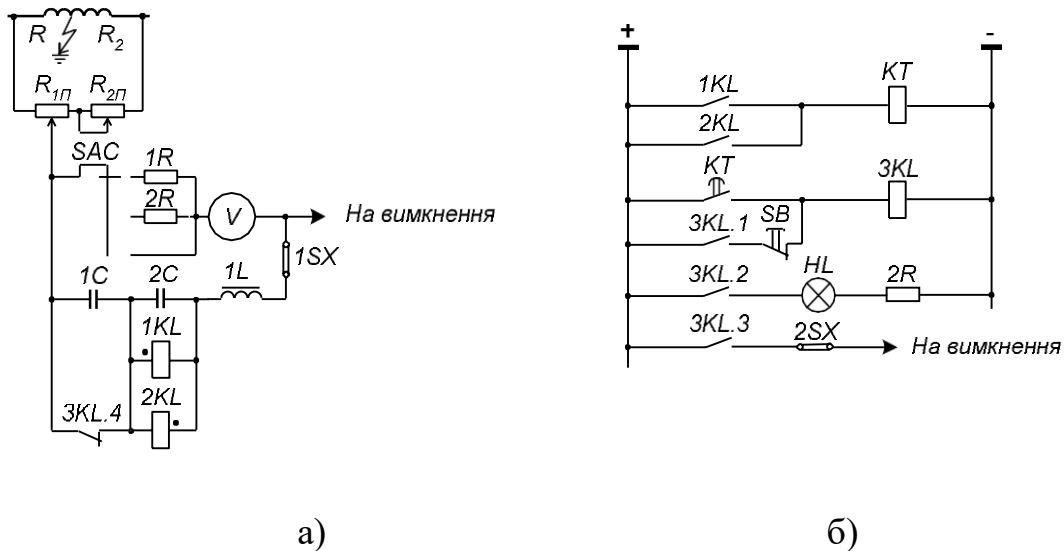


Рисунок 5.7 – Схема захисту від замикання в двох місцях кіл збудження генератора а) кола вимірювання, б) оперативні кола

У схемі захисту КЗР-2 (рис.5.7) для виявлення пошкодження в колах збудження застосовано чотирьохплечовий міст. Плечі моста утворюють опори  $R_1, R_2$  обмотки збудження відносно першого місця замикання та її полюсами (+, -) і опори потенціометрів  $R_{1\Pi}, R_{2\Pi}$ , встановлені між середнім виводом моста (перемикач SAC) та полюсами обмотки збудника.

До вала генератора пристрій приєднаний через спеціальну щітку, а не через заземлювальний контур, щоб струм, який протікатиме через діагональ моста, протікав безпосередньо через обмотки реле, а не через підшипники генератора.

Перед вводом захисту в роботу необхідно зрівноважити міст. Зрівноважують міст потенціометрами  $R_{1\Pi}, R_{2\Pi}$  – добиваються мінімального показу вольтметра V. Перед налаштуванням захисту розмикають накладку 2SX, щоб запобігти хибній дії захисту на аварійне вимкнення генератора під час налаштування. Вольтметр має три діапазони вимірів: 300 В, 30 В, 3 В. Перший діапазон призначений для попереднього регулювання, другий та третій – для точнішого регулювання. Перемикають діапазони перемикачем

SAC, вмикаючи в коло вольтметра  $V$  резистори  $1R$  (перший діапазон),  $2R$  (другий діапазон), або без резистора (третій діапазон).

Вимірні органи захисту – поляризовані реле  $1KL$  та  $2KL$ . Дросель  $1L$  та конденсатор  $2C$  обмежують протікання змінного струму через обмотки цих реле. Цей струм зумовлений пульсацією магнітного поля машини, яка виникає за нерівномірності повітряного проміжку між ротором та статором.

Після налагодження захисту його вводять в роботу, увімкнувши накладки  $1SX$ ,  $2SX$ .

Налаштована схема захисту КЗР-2 (рис.7) працює так.

За замикання в другому місці кіл збудження, порушується рівновага моста і спрацює одне з двох поляризованих реле – залежно від напрямку струму в діагоналі моста. Напрямок струму визначає те, ближче до якого з полюсів (+,–) обмотки збудження виникло друге замикання на землю.

Поляризовані реле  $1KL$  або  $2KL$  пускають реле часу  $KT$ , яке створює затримку в роботі захисту тривалістю  $0,5\text{--}1$  с. Це потрібно для відведення захисту від хибного спрацювання за перехідних процесів, що виникають у разі короточасних замикань у другому місці кіл збудження.

Реле часу  $KT$  спрацює з витримкою часу і подасть живлення до обмотки проміжного реле  $3KL$ , яке, самопідхопившись своїми контактами  $3KL.1$ , контактами  $3KL.2$ , подасть живлення на сигнальну лампу  $HL$ , а контактами  $3KL.3$  запустить систему аварійного вимкнення генератора від мережі.

За замикання в двох місцях кіл збудження, що розташовані поблизу протилежних полюсів, у діагоналі моста протікатиме значний струм, що може пошкодити поляризовані реле. Для обмеження часу протікання струму через обмотки реле  $1KL$ ,  $2KL$  передбачено контакти  $3KL.4$ , які розмикають коло живлення цих обмоток.

Конденсатор  $1C$  слугує для покращення умов комутації контактом  $3KL.4$  значного струму дроселя  $1L$ .

Для повернення реле  $3KL$  у вихідний стан слугує кнопка  $SB$ .

Основним недоліком захисту КЗР-2 є необхідність його налагодження та введення в роботу лише після появи замикання в одному місці кіл збудження. А на це потрібен час. Тому, якщо замикання в другому місці кіл збудження виникає відразу після появи замикання в одному місці, генератор практично не має захисту від замикання на землю в двох місцях. А це може мати катастрофічні наслідки для генератора. Тому вчасне вимкнення генератора можливе лише вручну і залежить від кваліфікації оперативного персоналу станції.

Захист обмотки ротора генератора від перевантаження струмом збудження

Перегрівання обмотки ротора (обмотки збудження) призводить до передчасного старіння її ізоляції і, як наслідок, до її пробою (комплект захисту КЗР 1). Тому необхідно контролювати температуру обмотки ротора. Обмотка ротора нагрівається нерівномірно. Для повного аналізу її температурного стану необхідно контролювати температуру в різних місцях ротора, але технічно це зробити доволі складно. Тому на практиці застосовують непрямий контроль температури обмотки ротора. Оскільки основною причиною перегрівання обмотки ротора є струм збудження, то контролюють його величину і за величиною струму збудження роблять висновок про температурний стан обмотки. Цей принцип використано в різних типах захисту обмотки ротора від перевантажень.

Для роботи захисту необхідно контролювати струм ротора генератора. Інформація про струм ротора подається до захисту від спеціальних давачів струму. Наявні різні давачі струму збудження. Основними з них є:

- константанова вставка;
- трансформатор постійного струму (магнітний підсилювач);
- індукційний короткозамкнений давач струму.

Найпростішим давачем струму збудження є константанова вставка. Константан – метал, який на відміну від міді, практично не змінює свого опору за певного діапазону температури (20–120°C). Невеликий фіксований об'єм константану впаюють у мідну обмотку збудження генератора (рис. 5.8). Спад напруги на цій вставці вимірюють за допомогою мілівольтметра.

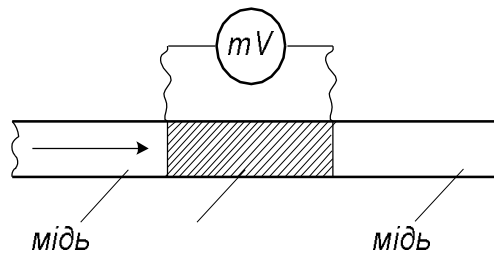


Рисунок 5.8 – Контроль струму збудження за допомогою константанової вставки

Якщо контролювати спад напруги на цій константановій вставці та знаючи її опір, можемо з достатньою точністю визначати величину струму обмотки ротора  $I_{\text{рот}} = \frac{U_{\text{к.вст}}}{R_{\text{к.вст}}}$ , де  $U_{\text{к.вст}}$  – спад напруги на константановій вставці;  $R_{\text{к.вст}}$  – опір константанової вставки, який вважають постійною величиною, що не залежить від нагрівання обмотки.

Але потужність джерела цієї напруги є недостатньою для роботи захистів, виконаних з застосуванням електромеханічних та напівпровідникових елементів. Таку схему контролю величини струму ротора можна застосовувати для цифрових захистів, вхідні кола яких споживають невелику потужність.

Для вимірювання струму обмотки ротора за тиристорної чи високочастотної систем збудження застосовують трансформатор постійного струму (рис. 5.9); за безщіткової 4 з'єднують послідовно за номінального струму ротора 1,5– 2,5 кА (в нашому випадку 1,725 кА), як показано на рисунку, або паралельно, коли номінальний струм ротора більший, ніж 3 кА.

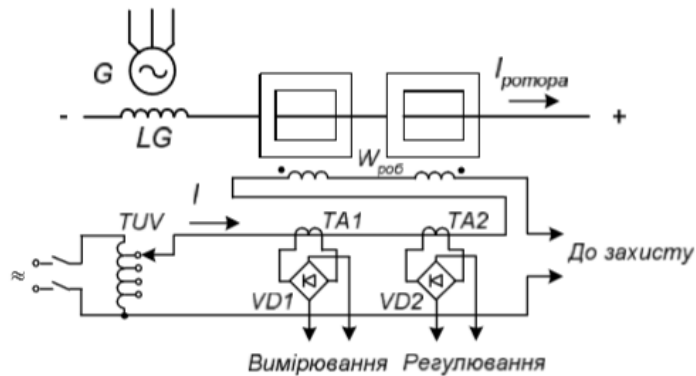


Рисунок 5.9 – Давач струму ротора з застосуванням трансформатора постійного струму

Вторинне навантаження ТПС (захист, кола вимірювання та регулювання) під'єднують у коло робочої обмотки.

Напругу джерела живлення з частотою 50 Гц або 400 Гц через автотрансформатор TUV підводять до робочої обмотки ТПС. Отже, струм у кола захисту, вимірювання та регулювання подається від цього джерела живлення через робочу обмотку ТПС.

У ТПС, що є дросельним магнітним підсилювачем з великим опором в колі управління, за зустрічно-послідовно увімкнених робочих обмоток роб  $w$  обох осердь і підведення до кола цих обмоток синусоїдної напруги живлення в цьому колі протікатиме змінний струм практично прямокутної форми з частотою напруги джерела живлення. Амплітуду цього струму можна визначити, застосувавши закон повного струму для магнітозв'язаних контурів – робочої обмотки  $w_{роб}$  і стрижня, що є обмоткою управління (кількість витків  $w_c = 1$ ), по якому протікає постійний (уніполярний) струм обмотки збудження генератора.

Для ТПС, з метою забезпечення необхідної точності вимірювань, застосовують осердя з прямокутною характеристикою намагнічення  $B(H)$ . Коли осердя ненасичене, сумарні ампервитки намагнічення осердя дуже малі, а індуктивність обмотки дуже велика, бо намагнічення (перемагнічення)

осердя відбувається за магнітної індукції осердя  $B < B_s$ . Коли осердя насичене – індуктивність обмотки дуже мала, бо в осерді магнітна індукція практично незмінна і дорівнює індукції насичення  $B = B_s$ . Осердя, у якому збігаються за знаком ампервитки обмоток  $w_c$  буде насичене і індуктивність його обмотки мала, до того ж у другому осерді ці ампервитки матимуть протилежні знаки, бо обмотки  $w_{роб}$  обох осердь увімкнені зустрічно-послідовно, а знак ампервитків обмотки  $w_c$  незмінний (в обмотці  $w_c$  протікає уніполярний струм). У цьому осерді, за зростання струму в його обмотці  $w_{роб}$ , сумарні ампервитки зменшуватимуться і коли вони наблизяться до значення, яке відповідає індукції виходу осердя з насичення  $B < B_s$ , почнеться перемагнічування ненасиченого осердя в діапазоні індукцій  $B < B_s$ . Тоді напруга живлення практично буде прикладена до обмотки  $w_{роб}$  ненасиченого осердя, для якого справедливий закон повного струму  $i_{роб} \cdot w_{роб} + i_c \cdot w_c = H \cdot l \approx 0$ , де  $H$  – напруженість магнітного поля та  $l$  – середня довжина магнітної силової лінії осердя. За зміни знака струму в обмотках  $w_{роб}$  насичене і ненасичене осердя "міняються режимами" – ненасичене осердя почне насичуватись, а насичене – виходити з насичення. Але рівняння для ампервитків обмоток далі відповідає режиму ненасиченого осердя. Отже, за  $w_c = 1$ , з цього рівняння отримують амплітудне значення струму  $I_{роб.м} = \frac{I_c}{w_{роб}}$ . Змінний струм  $I_{роб}$  прямокутної форми використовують для вимірювання струму обмотки ротора – випростовуючи  $I_{роб}$ , чи виділяючи основну гармоніку тощо.

Похибка ТПС (трансформатора постійного струму) для струмів ротора  $I_{рот.ном} (0,25-1,2) \cdot I_{рот.ном}$ ; не перевищує 1,53%. Для струму  $2 \cdot I_{рот.ном}$  похибка становить 5–10%.

За безщіткової системи збудження безпосередньо контролювати струм збудження неможливо. Тому використовують спеціальний перетворювач – індукційний сенсор струму (рис. 10). Це короткозамкнена "біляча клітка", яка охоплює вал генератора, всередині якого проходять проводи від збудника EGA до обмотки ротора LG. За обертання ротора генератора, в нерухомій "білячій клітці" обертове магнітне поле, зумовлене струмом збудження, що протікає по проводах від збудника EGA, індукує струми Фуко. Ці струми, своєю чергою, трансформуються у закорочену вторинну обмотку додаткового трансформатора струму ТА, яка водночас є первинною обмоткою трансформаторів струму ТА1, ТА2, ТА3. Від вторинних обмоток цих трансформаторів струму підводять струми до реагуючих органів систем вимірювання, регулювання та захисту. Параметри індукційного давача струму розраховані та обрані такими, що за номінального струму обмотки збудження генератора, вторинний струм трансформатора струму ТА дорівнює 2,5 А [1].

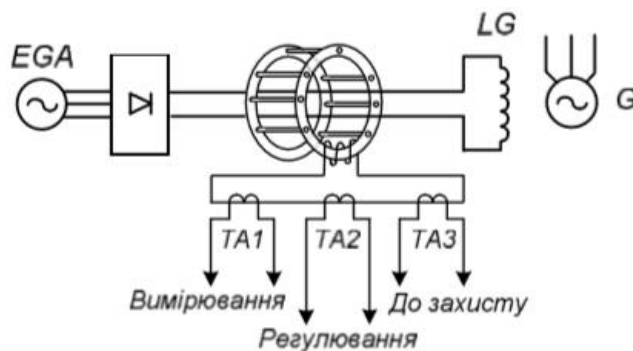


Рисунок 5.10 – Індукційний сенсор струму в обмотці ротора

Для генераторів, потужністю 160 МВт та більше, що експлуатують електростанції України, для захисту ротора від перевантаження застосовують захист типу РЗР-1М. Цей захист має два ступені. Перший ступінь з залежною від кратності струму перевантаження витримкою часу діє на розбудження генератора через систему автоматичного регулювання струму збудження, другий – також з залежною витримкою часу – на аварійне вимкнення

генератора від мережі. Витримки часу цих двох ступенів за тих самих струмів відрізняються на 20% (рис. 5/11).

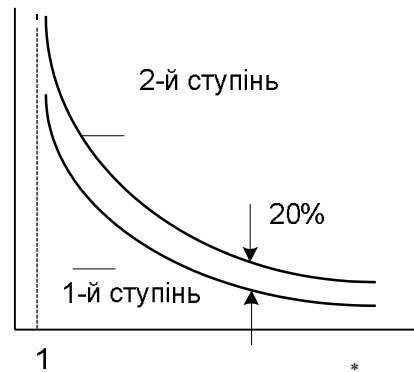


Рисунок 5.11 – Характеристики захисту від перевантаження обмотки ротора струмом збудження

До складу пристрою захисту типу РЗР-1М (рис. 12) входить вхідний перетворювальний пристрій (ВПП), призначений для налагодження вхідних кіл РЗР-1М на заданий вторинний номінальний струм обмотки ротора та для перетворення змінного струму в випростовану згладжену напругу. З виходу ВПП ця напруга подається до основних органів захисту – сигнального СО, пускового ПО, інтегрального ІО. Кожен з цих органів має свою уставку спрацювання.

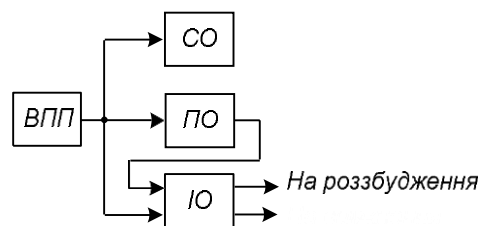


Рисунок 5.12 – Структурна схема захисту РЗР-1М

Сигнальний орган СО сигналізує про виникнення перевантаження кіл збудження. Діапазон уставок сигнального органу становить  $(1-1,2) \cdot I_{\text{рот.ном}}$ ; Зазвичай, встановлюють значення  $1,05 \cdot I_{\text{рот.ном}}$ . Тому вибираємо струм спрацювання сигнального органа захисту обмотки збудження (ротора)

Інтегральний орган ІО призначений для оцінювання акумуляції тепла в обмотці ротора. ІО розраховує кількість теплоти, яка нагромаджується в роторі з врахуванням перевантаження за струмом обмотки ротора та його охолодження після зняття перевантаження. Час спрацювання інтегрального органу становить

$$t = \frac{A}{(k \cdot (I_{*rot} - B))^2}, \quad (5.13)$$

де  $A$  – постійна, що враховує накопичення тепла в роторі;  $k$ ,  $B$  – коефіцієнти, що визначають вид характеристики та діапазон уставок;  $I_{*rot}$  – відносне значення струму збудження генератора.

Захист РЗР-1М виготовляють у двох модифікаціях – для захисту генераторів, для яких час допустимого двократного перевантаження за струму збудження становить відповідно 20 с та 30 с.

З однією витримкою часу (меншою) інтегральний орган діє на роззбудження генератора, з другою (більшою) – на аварійне вимкнення генератора від мережі.

Пусковий орган призначений для пуску інтегрального органу. Його уставка за струмом становить від 1,05 до 1,25 від номінального струму ротора, саме  $(1,05-1,25) \cdot I_{rot.ном}$ . Зазвичай, встановлюють уставку струмового захисту ротора гідрогенератора від замкнень в двох точках  $(1,05-1,25) \cdot I_{rot.ном}$ . В нашому випадку уставка ступені захисту дорівнює  $I_{сз\ rot} = 1.2 \cdot I_{rot.ном} = 1.2 \cdot 1750 = 2100 \text{ А}$

### **5.3 Опис схеми релейного захисту блоку генератор-трансформатор**

На схемі РЗ блоку Г-Т показані первинні кола (схема зліва зверху).

Первинні кола це ті кола, в яких ми показуємо обладнання яке захищаємо. В нашому випадку це синхронний генератор і показуємо вимірювальні трансформатори струму і трансформатори напруги. Обмотка статора генератора під'єднана до комплектного екранованого струмопроводу класом напруги 18 або 24кВ. 18 кВ це генератори ТГВ-300, а 24 кВ це ТВВ-1000, тому напруга висока. Відповідно до правил улаштування електроустановок високою називається напруга яка перевищує 1000В. Генератор комплектним екранованим струмопроводом під'єднаний до силового трансформатора, силовий трансформатор є підвищувальним, тому кола вимірювальних трансформаторів струму (їх первинні обмотки) в таких колах під'єднані до високої напруги. Отже на схемі первинних з'єднань, яка знаходиться в лівій частині креслення РЗ блоку Г-Т то ці кола є високовольтними тому вони називаються первинними.

На схемі показані резервний диференційний захист, захист ошинування та реле пристрою резервування відмов вимикачів (ПРВВ) Q1 та Q2, диференційний захист трансформатора та пристрій контролю ізоляції високовольних вводів (КІВ), захист від зовнішніх КЗ на землю на стороні ВН, повздовжній диференційний захист генератора, дистанційний захист та захист від втрати збудження, захист ротора від перевантаження та від замикань на землю, захист від симетричного на несиметричного перевантаження, захист від підвищення напруги, поперечний диференційний захист, блокування КРБ-12, захист від замикань на землю обмотки статора.

Показано що в лініях електропередач, а також на ВРП до кожного приєднання ( в нашому випадку приєднання блочного трансформатора) підключені 2 вимикачі Q1 та Q2, в колах вимикач Q1 – місце під'єднання блоку ГТ1 до ВРП встановлені трансформатори струму ( в колах вимикача Q1 та Q2 по 2 ТС). Обмотки перших двох ТС з'єднані в трикутник, інші два з'єднані у зірку з нулем. До тих що з'єднані в трикутник під'єднані штекерні роз'єми до вторинних обмоток SG1 до трикутника Q1 і SG2 до іншого трикутника іншого вимикача, а далі до блоку резервного диференційного захисту, який на схемі

позначається прямокутником і з'єднаний трьома провідниками. Це блок AKW2, нище в колах Q1 і Q2 встановлені ще трансформатори струму (їх вторинні обмотки з'єднані в зірку). Через роз'єми SG3, SG4 а потім SG5 сигнал з вторинної обмотки трансформаторів струму подається на реле KAW4,5,6. Це означає що таких реле 3 по одному в кожній фазі. Це струмове реле напрямку потужності і задієне воно в захисті ошинування та в захисті реле ПРВВ Q1 та Q2. В колах вторинної обмотки, тобто в вводах трансформатора по кожній фазі є ТС, які мають по дві вторинні обмотки в кожній фазі. З вторинної обмотки першого ТС струм подається в кола роз'єма SG6 і реле KAW4,5,6 тобто в кола захисту ПРВВ Q1 і Q2. Також до струмопроводу комплектно екранованого, який відходить від обмотки ВН блочного трансформатора під'єднаний пристрій контролю ізоляції(KSZ) (під'єднується він через конденсатор для зменшення напруги). Також показаний комплект захисту KSG( комплект газового захисту трансформатора). Газове реле має два вихідних герконових реле, перше спрацьовує на сигнал, друге на відключення трансформатора. На РПН встановлено струмове реле має лише одну ступінь і працює лише на сигнал.

Розглядаємо вторинні кола +- 220В. (схема зліва знизу)

На схемі вторинних кіл захисту Г-Т (4) показано диференційний захист трансформатора, газовий захист трансформатора, контроль ізоляції вводів (KIB), захист від замикань на землю обмоток статора, поперечний диференційний захист генератора, повздовжній диференційний захист генератора, датчик пожежі в трансформаторі, захист трансформатора ТВП, захист від підвищення напруги.

На схемі (зправа зверху) показані кола що здійснюють автоматичне ділення шин, кола що діють на відключення блоку Г-Т від мережі, кола які діють на гасіння поля ротора та відключення трансформатора ТВП, показані кола переходу в допустимий асинхронний режим, кола які діють на зупинення блоку Г-Т. На нижній частині схеми показані захист та ошинування кола пристоя резервування відмов вимикачів в Q1 та Q2 одночасно.

Нище показані контактні групи, які діють на сигнал - вказівник не піднятий, діють на сигнал під час спрацювання газового захисту, перевантаження струмом  $I_2$ (струм збудження), на сигнал 'земля в роторі', кола сигналізації про перевантаження ротора, кола сигналізації про втрату збудження, тобто розрив кола обмотки ротора( збудження) і далі сигнал про симетричне перевантаження.

#### **5.4 Розрахунок релейного захисту блоку "Генератор-трансформатор"**

Генератори 100 і більше МВт об'єднують в один блок – генератор – трансформатор - лінія. В результаті порушення нормальної роботи одного елемента такого блока – весь блок виводиться з роботи. Тому існує необхідність захисту блока "генератор - трансформатор" [4].

На генераторах, трансформаторах, з'єднаних в один блок встановлюються ті ж захисти, що й у випадку їхньої роздільної роботи плюс повздовжній струмовий захист блоку «генератор - трансформатор».

Однак, об'єднання в один робочий агрегат декількох елементів великої потужності викликає деякі особливості в вимогах до захистів і в окремих випадках у виконанні захисту.

Розрахункова схема для визначення струмів КЗ подана на наступному рисунку

$$I_{2II,0*}^{(2)} = \frac{E_{q*}''}{X_d'' + X_2} = \frac{1,166}{0,27 + 0,327} = 1,953 \text{ в.о.} \quad (5.13)$$

Параметри гідрогенератора СВ-1500/170-96 90 (СВ-вертикальний синхронний генератор).

$S_H = 117.65 \text{ МВА}$ ;  $P_H = 100 \text{ МВт}$ ;  $U_H = 13,8 \text{ кВ}$ ,  $I_H = 4,92 \text{ кА}$ ;  $\cos \varphi = 0,85$ ,  $n_{об} = 62,5 \text{ об/хв}$ ,  $OK3 = 1,75$ ,  $x_d'' = 0,21$ ,  $x_d' = 0,21$ ,  $x_d^l = 0,29$ ,  $x_d = 0,65$ ,  $x_q'' = 0,23$ ,

$x_q=0.59$ ,  $x_q''=0.23$ ,  $x_q=0.59$ ,  $x_2=0.22$ ,  $x_0=0.1$ ,  $T_{d0}=5,3\text{сек}$ ,  $I_{f\text{ном}}=1795\text{ A}$ ,  $I_{f\text{ном}}/I_{fx}=1.75$ ,  $U_{f\text{ном}}=430\text{ В}$ ,  $K_f=2.2$ ,  $\eta=97,5\%$ ,  $j=80000\text{ Т}\cdot\text{М}^2\cdot 0.25$ .

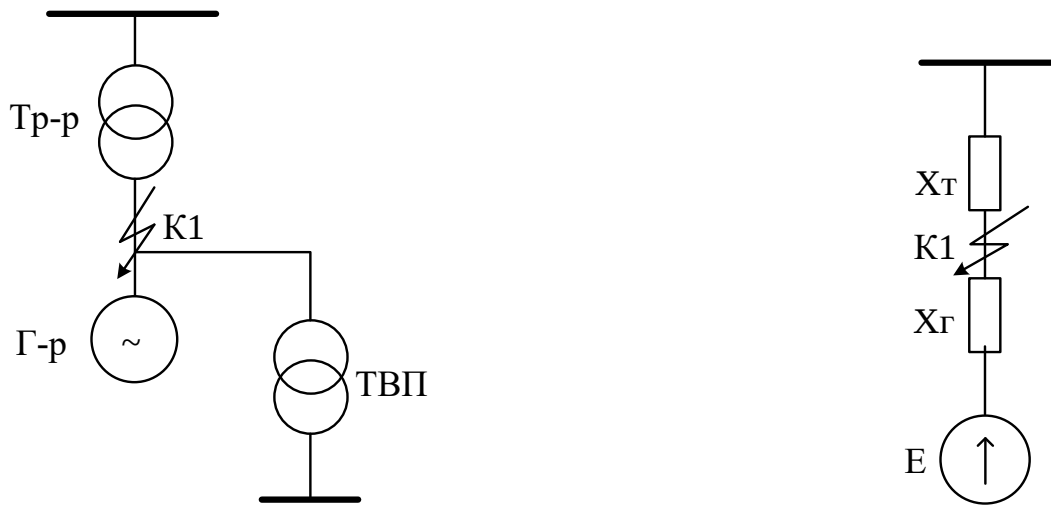


Рисунок 5.13 –Розрахункова схема і заступна схема

#### 5.4.1 Розрахунок струмів КЗ для вибору уставок захисту

Для вибору уставок захисту розрахуємо струми КЗ для початкового моменту часу й у сталому режимі, а також зміну їх у процесі КЗ; у таблицях приведені параметри генератора і трансформатора.

Визначаємо поперечну зверхперехідну ЕРС обмотки статора:

$$E_{q*}'' = \sqrt{(U_{\text{ном}*} \cdot \cos \phi_{\text{ном}})^2 + (U_{\text{ном}*} \cdot \sin \phi_{\text{ном}} + I_{\text{ном}*} \cdot x_q'')^2}$$

де  $U_{\text{ном}*} = I_{\text{ном}*} = 1$ ;  $\sin \phi_{\text{ном}} = \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{\text{ном}}} = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,55$ .

$$E_{q*}'' = \sqrt{(1 \cdot 0,9)^2 + (1 \cdot 0,55 + 1 \cdot 0,23)^2} = 1,104.$$

Розрахуємо струми КЗ на затискачах генератора (точка  $K_1$ )

$$I_{1*}^{(3)} = E_{q*}''/x_q'' = 1,104/0,23 = 5,259;$$

$$I_{2*}^{(2)} = E_{q*}''/(x_d'' + x_{2*}) = 1,104/(0,21 + 0,22) = 2,568,$$

де  $x_2$  – опір оберненої послідовності генератора.

Значення струмів в іменованих одиницях:

$$I_1^{(3)} = I_{1*}^{(3)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 5,259 \cdot 4,92 = 25,874 \text{ (кА)};$$

$$I_2^{(2)} = I_{2*}^{(2)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 2,568 \cdot 4,92 = 12,634 \text{ (кА)}.$$

Розрахуємо струми КЗ за блочним трансформатором (точка  $K_2$ ).

$$I_{1*}^{(3)} = E_{q*}'' / (x_d'' + x_{\sigma T*}) = 1,104 / (0,21 + 0,0988) = 3,575;$$

$$I_{2*}^{(2)} = E_{q*}'' / (x_d'' + x_{2*} + 2 \cdot x_{\sigma T*}) = 1,104 / (0,21 + 0,22 + 2 \cdot 0,0988) = 0,165;$$

$$I_{2*}^{(1)} = E_{q*}'' / (x_d'' + x_{2*} + 2 \cdot x_{\sigma T*} + x_{0T*}) = 1,104 / (0,21 + 0,22 + 2 \cdot 0,0988 + 0,088) = 0,145;$$

$$I_{2*}^{(1,1)} = \frac{E_{q*}''}{x_d'' + x_{\sigma m*} + \frac{(x_{2*} + x_{\sigma m*}) \cdot x_{0m*}}{x_{2*} + x_{\sigma m*} + x_{0m*}}} \cdot \frac{x_{0m*}}{x_{2*} + x_{\sigma m*} + x_{0m*}} = 0,635.$$

$$I_1^{(3)} = I_{1*}^{(3)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 3,796 \cdot 10,2 = 38,717 \text{ (кА)};$$

$$I_2^{(2)} = I_{2*}^{(2)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 1,768 \cdot 10,2 = 18,039 \text{ (кА)};$$

$$I_2^{(1)} = I_{2*}^{(1)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 1,552 \cdot 10,2 = 15,83 \text{ (кА)};$$

$$I_2^{(1,1)} = I_{2*}^{(1,1)} \cdot I_{\Gamma.\text{НОМ}} = 0,635 \cdot 10,2 = 6,481 \text{ (кА)}.$$

#### 5.4.2 Захист від багатозначних КЗ в обмотці статора і на його

##### ВИВОДАХ

Використовуємо повздовжній диференційний захист з циркулюючими струмами на реле ДЗТ-11/5.В данному випадку схема з'єднання обмоток статора – “зірка-зірка”, застосовуємо трансформатори струму на лінійних виводах з коефіцієнтом трансформації 10000/5, а в нейтралі – 10000/5, для поперечного диференційного захисту – 1500/5; тоді робоча кількість витків обмотки реле  $W_{\text{роб}} = 64$  витка.

Максимальне розрахункове значення первинного струму небаланса  $I_{\text{нб.роз.макс}}$  у встановленому режимі протікання через ТТ зовнішнього розрахункового максимального струму:

$$I_{\text{нб.роз.макс}} = \varepsilon \cdot K_{\text{одн}} \cdot I_{\text{зовн.розр.макс}} = 0,1 \cdot 1 \cdot 79,95 = 7,995 \text{ кА}$$

де  $K_{\text{одн}} = 1$ , оскільки трансформатори струму однакові.

визначаємо робочу МРС при протіканні по робочій обмотці струму небалансу:

$$F_{\text{роб}} = \frac{K_{\text{відстр}} \cdot I_{\text{нб.розр.макс}} \cdot W_{\text{роб}}}{n_{\text{тс}}} = \frac{1.6 \cdot 7995 \cdot 64}{2000} = 409,344 \text{ А витки}$$

визначаємо гальмівну МРС за виразом:

$$F_{\text{гальм}} = 136 \cdot \sqrt{\frac{F_{\text{роб}}^2}{100^2} - 1} = 136 \cdot \sqrt{\frac{409,344^2}{100^2} - 1} = 27,516 \text{ А витки}$$

Визначаємо значення вторинного гальмівного струму:

$$I_{\text{гальм.втор}} = \frac{I_{\text{зовн.розр.макс}}}{n_{\text{тс}}} = \frac{7995}{2000} = 3,998 \text{ А}$$

Розрахункове кількість витків гальмівної обмотки складає:

$$W_{\text{гальм.розр}} = \frac{F_{\text{гальм.}}}{I_{\text{гальм.втор}}} = \frac{27,516}{3,998} = 6,882 \text{ витків}$$

приймаємо найближче ціле значення 7 витків.

#### 5.4.3 Захист від замикань на землю в обмотці статора

Використовуємо комплект захисту ЗЗГ-1 – захист напруги першої та третьої гармонік без зони нечутливості. Захист складається з двох органів :

- 1) максимального реле напруги першої гармоніки – яке захищає 85-90% витків обмотки статора зі сторони лінійних виводів;
- 2) реле напруги третьої гармоніки з гальмуванням – яке захищає до 35% витків обмотки статора зі сторони нейтралі і саму нейтраль.

До цих реле підводять напругу зі сторони лінійних виводів від ТН типу ЗНОМ з напругами  $U_{\text{ф}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} \text{ В}$ , а для реле з гальмуванням додатково

підводиться напруга зі сторони нульових виводів від спеціально встановленого ТН типу ЗНОЛ або ЗОМ з напругами  $(\frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}})100$  В.

Цей захист діє з незалежною витримкою часу до 0,5 с.

#### 5.4.4 Захист обмотки статора від зовнішніх симетричних КЗ

Використовуємо одноступеневий дистанційний захист. Реле включається на різницю фазних струмів від ТС, встановленого зі сторони нульових виводів, і на міжфазну напругу від ТН, який встановлений на лінійних виводах. Реле має кругову характеристику, розташовану в першому квадранті зі зміщенням в третій квадрант і охопленням початку координат. Захист виконується з двома ступенями витримки часу.

Визначимо опір спрацювання захисту:

$$Z_{c3} = \frac{0.95 \cdot U_{г.ном}}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot I_{г.ном} \cdot K_{відс} \cdot K_v \cdot \cos(f_{мч} - f_{нав})},$$

$$Z_{c3} = \frac{0.95 \cdot 20}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot 10.2 \cdot 1.2 \cdot 1.05 \cdot \cos(80^\circ - 31.5^\circ)} = 0.859 \text{ Ом}$$

де  $K_{відс} = 1.2$ ,  $K_v = 1.05$ ,  $\varphi_{мч} = 80^\circ$  - кут максимальної чутливості,  $\varphi_{нав} = 31.5^\circ$  -

кут навантаження реле

Коефіцієнт чутливості захисту повинен задовольняти умові

$$K_q = \frac{Z_{c3}}{Z_{уч}} \geq 1.2,$$

де

$$Z_{уч} = Z_r + Z_t = X_d'' \cdot \frac{U_6^2}{S_{г.ном}} + \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_6^2}{S_{г.ном}} = 0.195 \cdot \frac{20^2}{352.9} + \frac{10.5}{100} \cdot \frac{20^2}{400000} = 0.0232$$

Витримка часу першого ступеню захисту узгоджується з найбільшою витримкою часу резервних захистів від міжфазних КЗ на елементах, приєднаних до шин ВН:

$$t_{сз1} = t_{ел.макс} + \Delta t = 0.5 + 0.5 = 1 \text{ с}, t_{сз2} = t_{сз1} + \Delta t = 1 + 0.5 = 1.5 \text{ с}.$$

#### 5.4.5 Захист від КЗ між витками однієї фази обмотки статора

Використовуємо односистемний поперечний диференційний захист з реле струму РТ – 40/Ф з фільтром першої гармоніки. Струм спрацювання реле:

$$I_{с.р.} = \frac{I_{с.з.}}{n_{тс}} = \frac{0.2 \cdot I_{г.ном}}{n_{тс}} = \frac{0.2 \cdot 10.2}{500} = 4.08 \text{ А}$$

#### 5.4.6 Захист обмотки статора від зовнішніх несиметричних КЗ та несиметричних перевантажень

Застосовується струмовий захист зворотної послідовності з інтегрально-залежною витримкою часу. Він виконується одним реле струму зворотної послідовності з фільтром – РТФ-6М. Це реле складається з п'яти елементів :

- 1) пусковий орган без витримки часу, який забезпечує пуск та повернення інтегрального органу та блокування органу “відсічка 2”

$$I_{сз.по} = 0.1 \cdot I_{г.ном} = 0.1 \cdot 10.2 = 1.02 \text{ кА}.$$

- 2) інтегральний орган з інтегрально-залежною витримкою часу, який забезпечує правильну роботу захисту при зміні струму зворотної послідовності і охолодженні ротора після усунення перевантаження

$$t_{доп} = \frac{A}{I_{г.2*}^2} = \frac{8}{2.576^2} = 1.206 \text{ с}$$

- 3) “Відсічка 1” спрацьовує без витримки часу і передбачається для дії захисту з незалежною витримкою часу в якості резервного захисту від зовнішніх несиметричних КЗ

$$I_{сз.відс.1} = 0.4 \cdot I_{г.ном} = 0,4 \cdot 10,2 = 4,08 \text{ кА}$$

- 4) “Відсічка 2” спрацьовує без витримки часу і передбачається для резервування швидкодіючих захистів ТГ з незалежною витримкою часу, і утворюється виносним реле часу

$$I_{сз.відс.2} = \frac{I_2^{(2)}}{K_q} = \frac{18,039}{1,2} = 15,033 \text{ кА}$$

- 5) Сигнальний орган спрацьовує без витримки часу і передбачається для фіксації з незалежною витримкою часу недопустимого несиметричного навантаження генератора

$$I_{сз.сигн} = 0.05 \cdot I_{г.ном} = 0,05 \cdot 10,2 = 0,51 \text{ кА}$$

#### **5.4.7 Захист обмотки статора від симетричних перевантажень**

Застосовується МСЗ з незалежною витримкою часу, виконується за допомогою реле РТВК з  $K_v = 0.99$ . Струм спрацювання захисту

$$I_{сз} = \frac{K_{відс}}{K_v} \cdot I_{г.ном} = \frac{1.05}{0.99} \cdot 10.2 = 10.81 \text{ кА}$$

Час спрацювання захисту узгоджується з захистом, який діє на відключення.

#### **5.4.8 Захист ротора від перевантаження струмом збудження**

Застосовується інтегральний захист з двома ступенями з залежною витримкою часу – блок РЗР-1М.

Вхідний перетворюючий пристрій, який настраюється таким чином,

$$\frac{I_{\text{роб.ном.втор}}}{I_{\text{рзр.ном}}} = 0.7 \div 1.2.$$

Сигнальний орган спрацьовує без витримки часу при струмах збудження, які перевищують довготривале допустиме значення.

$$I_{\text{сз.сигн.перв}} = 1.05 \cdot I_{\text{рот.ном}} = 1.05 \cdot 2680 = 2814 \text{ А}, \quad t_{\text{с.о}} = 10 \text{ с.}$$

Пусковий орган спрацьовує без витримки часу і контролює пуск та спрацювання повертаючого органа

$$I_{\text{сз.по.перв}} = 1.1 \cdot I_{\text{рот.ном}} = 1.1 \cdot 2680 = 2948 \text{ А.}$$

Інтегральний орган працює з двома інтегрально-залежними витримками часу в залежності від накопичення теплоти в обмотці охолодження при перевантаженні. Цей орган використовує пристрій И – 528, що містить трансформатор постійного струму.

#### **5.4.9 Часовий додатковий захист ротора від перевантаження струмом збудження при його роботі з резервним збудником**

Застосовується максимальний захист напруги з незалежною витримкою часу. Напруга спрацювання захисту

$$U_{сз} = 1.5 \cdot I_{рот.ном} \cdot R_{рот.ном} = 1.5 \cdot 2680 \cdot 0,15 = 619,1В, \quad t_{сз} = 20 \text{ с.}$$

#### 5.4.10 Захист від асинхронного режиму при втраті збудження

Застосовується одноступеневий дистанційний захист з незалежною витримкою часу і використовується для захисту одне з трьох реле опору комплексу КРС-2. Реле включають на різницю фазних струмів від ТС та на міжфазну напругу від ТН, щоб кругова характеристика розташовувалась в третьому та четвертому квадрантах комплексної площини опорів і не охоплювала початок координат. Лінія максимальної чутливості на комплексній площині при куті максимальної чутливості  $80^\circ$  розташовується в третьому квадранті під кутом  $260^\circ$ .

Діаметр кола характеристики приймаємо рівним:

$$d = 1.1 \cdot x_{d*} = 1.1 \cdot 1,84 = 2,024,$$

$$a \text{ зсув } C_m = 0.4 \cdot x'_{d*} = 0.4 \cdot 0,3 = 0.12$$

При цих параметрах забезпечується відведення захисту від нормального режиму, режиму недозбудження та від асинхронного режиму в енергосистемі. Час спрацювання захисту  $t_{сз} = 1 - 2 \text{ с.}$

Захист приводиться в дію після появи струму в статорі генератора з витримкою часу, яка забезпечує режим самосинхронізації.

#### 5.4.11 Захист від підвищення напруги на виводах ТГ і БТ

Використовується максимальний захист напруги з незалежною витримкою часу. Захист передбачений для запобігання неприпустимого підвищення напруги в режимі холостого ходу або скидання навантаження. В якості пускового органа використовується реле напруги типу РН-58/200 з високим коефіцієнтом повернення. Для виводу захисту з дії в робочому режимі генератора використовується реле струму типу РТ-40/Р. На блоках без вимикача у генератора реле струму контролює струм в колі ВН

трансформатора. Реле напруги вмикається на міжфазну напругу ТН на виводах генератора. Реле часу повинно бути термічно стійким. Напруга спрацювання пускового органу:

$$U_{c.з} = 1,2 \cdot U_{Г.ном} = 1,2 \cdot 20000 = 24000 \text{ (В)};$$

$$U_{c.р} = U_{c.з} / n_T = 24000 / (20 / 0,1) = 120 \text{ (В)}.$$

Струм спрацювання блокуючого реле:

$$I_{c.р} = K_{сх} \cdot I_{c.з} / n_T = 0,1 \cdot K_{сх} \cdot I_{Г.ном} / n_T = 0,1 \cdot 1 \cdot 10200 / (10000 / 5) = 0,51 \text{ (А)}.$$

де  $K_{сх}$  – коефіцієнт схеми з'єднань обмоток ТС.

Витримка часу захисту приймається  $t_{c.з} \approx 3 \text{ с}$ .

#### **5.4.12 Захист від замикань на землю в одній точці кола ротора**

Застосовується захист типу КРЗ-3, який виконується з накладенням на коло збудження змінного струму частотою 25 Гц.

#### **5.4.13 Захист від усіх видів КЗ в обмотках трансформатора, на його виводах, ошиновці ВН та від багатofазних КЗ в обмотці статора ТГ**

Встановлюється загальний повздовжній диференційний струмовий захист з реле типу ДЗТ-21, виконаний трифазним на всіх сторонах, з використанням трьох реле для підвищення чутливості і надійності.

Струм спрацювання захисту:

$$I_{c.з} = 0,3 \cdot I_{ном.ВН} = 0,3 \cdot \frac{S_{ном.Г}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном.ВН}} = 0,3 \cdot \frac{352,9}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,505 \text{ (кА)},$$

де  $I_{ном.ВН}$  – номінальний струм генератора на стороні ВН блочного трансформатора, кА.

Коефіцієнт чутливості захисту

$$K_{\text{ч}}^{(3)} = 0,87 \cdot I_{k \max \text{ ВН}}^{(3)} / I_{\text{с.з}} = 0,87 \cdot 38,717 / 0,505 = 66,7 \geq 2,$$

де  $I_{k \max \text{ ВН}}^{(3)}$  – трифазний струм КЗ на стороні ВН блочного трансформатора.

#### 5.4.14 Захист від замикань в середині кожуха трансформатора

Використовується газове реле типу РГЧЗ-66. Газове реле складається з двох елементів – сигнального і вимикаючого. Сигнальний елемент спрацьовує при пошкодженнях, які супроводжуються слабким газоутворенням після накопичення визначеного об'єму газу в реле. При значному пошкодженні, яке призводить до бурного виділення газу, підвищується тиск всередині бака і утворюється потік масла в сторону розширювача, який діє на вимикаючий елемент. Останній спрацьовує при перевищенні заданої швидкості потоку масла. При цьому газ з бака трансформатора потрапляє в газове реле і призводить до спрацьовування сигнального елемента пізніше дії вимикаючого елемента.

#### 5.4.15 Захист від зовнішніх КЗ на землю в мережі з заземленими нейтралями при роботі трансформатора з заземленою нейтраллю

Встановлюється двоступеневий струмовий захист нульової послідовності з незалежною витримкою часу. Перша ступінь – з реле струму типу РТ-40 і реле часу. Друга – з реле струму РТ-40 і реле часу. Реле струму включають на струм нейтралі трансформатора блоку.

Уставка I комплекту:

$$I_{\text{с.з. I}} = I_{\text{ном.ВН}} / 1,5 = 1683 / 1,5 = 1122(\text{А});$$

$$I_{\text{с.р. I}} = I_{\text{с.з. I}} / n_{\text{T}} = 1122 / (400 / 5) = 14,03 (\text{А}).$$

Уставка більш чутливого II-го комплекту повинна відповідати двом умовам:

– забезпечення надійного спрацьовування при самовільному неповнофазному відключенні блока при мінімальному навантаженні:

$$I_{с.з. II} = 0,4 \cdot I_{с.з. I} / 1,2 = 0,4 \cdot 1122 / 1,2 = 299,2 \text{ (A)};$$

$$I_{с.р. II} = I_{с.з. II} / n_T = 299,2 / (400 / 5) = 3,74 \text{ (A)}.$$

– узгодження з захистом I-го комплекту:

$$I_{с.р. II} = I_{с.р. I} / 1,05 = 14,03 / 1,05 = 13,66 \text{ (A)}.$$

Приймаємо найменше з отриманих значень:  $I_{с.р. II} = 3,74 \text{ (A)}.$

Витримка часу на ділення приймається більшою з розрахованих по двом умовам:

– узгодження з резервними захистами елементів, приєднаних до шин ВН:

$$t_{с.з. діл} = t_{с.з. ел. max} + \Delta t = 0,5 + 0,5 = 1 \text{ (с)};$$

– узгодження з витримкою часу захисту, що діє на прискорення:

$$t_{с.з. діл} = t_{с.з. пр} + \Delta t = 0,1 + 0,5 = 0,6 \text{ (с)}.$$

Витримка часу першої ступіні II-го комплекту:

$$t_{с.з. I} = t_{с.з. діл} + \Delta t = 1 + 0,5 = 1,5 \text{ (с)}.$$

Витримка часу другої ступіні II-го комплекту:

$$t_{с.з. 2} = t_{с.з. I} + \Delta t = 1,5 + 0,5 = 2 \text{ (с)}.$$

Коефіцієнт чутливості захисту:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{кз min вн}} / I_{\text{с.з.}} = 6481 / 1122 = 5,77 \geq 1,2.$$

### Висновки до розділу 5

Вимоги до надійності релейного захисту і автоматики у великій мірі залежать від ступеня їх впливу на роботу конкретного енергетичного обладнання, а їх, у свою чергу, на роботу конкретної електростанції або електричної мережі, енергосистеми в цілому.

Особливо високі вимоги висувуються до силових трансформаторів великої потужності, які входять до складу блока «генератор-трансформатор». Робота блока залежить від роботи блочного трансформатора і вихід його з ладу призводить до відключення блока, це може бути причиною розвалу енергосистеми. Для блоків АЕС неможливість видавати потужність при працюючому реакторі взагалі є аварійною ситуацією.

Релейний захист та автоматика таких трансформаторів виконується найбільш повно. За кордоном експлуатуються мікропроцесорні та мікрокомп'ютерні системи релейного захисту і автоматики трансформаторів різних потужностей.

Пошкоджуваність трансформаторів безпосередньо впливає на надійність енергосистеми в цілому, тому зрозумілою є особлива увага до забезпечення їхньої працездатності. Цього вимагає і статистика пошкоджень: з вини персоналу, наприклад, аварії трансформаторів в електричних мережах викликають 80-90% недовідпущення електроенергії, а на електростанціях - 10-20%

## **6 ЗАХОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ТА БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК**

### **6.1 Задачі розділу**

Гарантії прав на охорону праці починаються вже з моменту обговорення та укладання трудової угоди, оскільки згідно ст. 5 Закону «Про охорону праці» умови трудового договору не можуть містити положень, що суперечать законам. Під час укладання трудового договору роботодавець повинен проінформувати працівника під розписку про умови праці та про наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які ще не усунуто, можливі наслідки їх впливу на здоров'я та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах.

Працівнику не може пропонуватися робота, яка за медичним висновком протипоказана йому за станом здоров'я. До виконання роби підвищеної небезпеки та тих, що потребують професійного добору, допускаються особи за наявності висновку психофізіологічної експертизи [17]

Враховуючи те, що для мінімізації ризику професійного захворювання та травматизму працівників що займаються питаннями експлуатації ГЕС, пов'язаних з експлуатацією систем релейного захисту вимагається вирішення цілого комплексу питань з охорони праці, тому сформулюємо основні задачі охорони праці за темою «Релейний захист гідрогенераторів 100 МВт»:

1. Провести аналіз умов праці для персоналу, пов'язаних з роботою персоналу служби релейного захисту, які працюють у складі електроенергетичної системи України, за міждержавним стандартами.

2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці при виконанні робіт служби релейного захисту. Розглянути питання освітлення у приміщенні, де працюють інженери.

## **6.2 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта**

### **6.2.1 Санітарно-гігієнічні вимоги до робочого середовища користувача ПК**

Основним обладнанням робочого місця користувача є відеомонітор, клавіатура, робочий стіл, стілець (крісло). Вимоги до них відображені у нормативних документах.

Під просторовою орієнтацією робочого місця розуміється розміщення у певному порядку елементів основного та допоміжного обладнання відносно одне одного та працюючої людини. Просторова організація робочого місця в основному визначається розмірами та формою сенсорного та моторного простору, формою та параметрами елементів робочого місця та просторовим розташуванням елементів відносно працюючого [17].

Робочі місця повинні розташовуватися на відстані не менше як 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на відстані 1 м, між собою на відстані не менше як 1,5 м. При розміщенні робочих місць необхідно виключити можливість прямого засвічування екрана джерелом природного освітлення. Джерело природного освітлення (вікно) не повинно також потрапляти у зону прямого спостереження користувача. Відносно світлових отворів робочі місця доцільно розташовувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва.

При розміщенні ПК на робочому місці потрібно забезпечити простір для користувача величиною не менше як 850 мм з урахуванням виступаючих частин обладнання та застосування (при необхідності) спецодягу. Для стоп має бути передбачено простір по глибині та висоті не менше як 150 мм, по ширині — не менше як 530 мм.

Розташовувати ПК на робочому місці необхідно так, щоб поверхня екрана знаходилася на відстані 400 - 700 мм від очей користувача. Рекомендується розміщувати елементи робочого місця таким чином, щоб витримувалася однакова відстань очей користувача від екрана, клавіатури, тримача документів.

Залежно від виду роботи та зручності користувача доцільно користуватися можливістю повороту та регулюванням нахилу екрана. Ця вимога тим більш важлива, чим численнішими та різноманітнішими є заплановані випадки застосування ПК. Установка рівня екрана над столом та його розташування повинні забезпечуватися за допомогою вторинних пристроїв на робочому місці.

Необхідно стало розташовувати клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання. Разом з тим має бути передбачена можливість її поворотів та переміщень. Положення клавіатури та кут її нахилу повинні відповідати побажанням користувача.

Принтер треба розташовувати так, щоб доступ до нього користувача та його колег був зручним.

Конструкція робочого столу повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з урахуванням його кількості, розмірів, конструктивних особливостей та характеру роботи, яка виконується. Корисно мати модульне, рухоме робоче місце. Площа столу залежить від всіх необхідних для роботи компонентів, що розміщуються, та повинна допускати можливість вільного переміщення пристроїв. Поверхня столу має бути матовою з малим відбиттям та теплоізолюючою.

Розташування технічних засобів повинно давати можливість користувачеві виконувати прості функції лівою рукою з метою зниження великих навантажень на праву руку під час ведення записів, роботи з клавіатурою та інших операцій. Якщо у конструкції клавіатури не передбачено простору для опори долонь, то її слід розташовувати на відстані не менше як 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моторного поля.

Якщо конструкція робочого місця передбачає протікання трудового процесу у позі сидючи, то висота робочої поверхні столу повинна регулюватися у межах 680 - 800 мм, у середньому вона повинна становити 725 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше як 600 мм,

шириною не менше як 500 мм, глибиною на рівні колін, але не менше як 450 мм та на рівні витягнутої ноги – не менше як 650 мм.

Робоче крісло забезпечує підтримання робочої пози у положенні сидючи, і чим триваліше це положення протягом робочого дня, тим жорсткішими мають бути вимоги до створення зручних та правильних робочих сидінь.

Існує цілий ряд публікацій щодо конструювання різних типів робочих крісел. Незважаючи на розбіжність думок дослідників у визначенні деяких параметрів, виділяють загальні рекомендації конструювання крісла: необхідність регулювання найбільш важливих його елементів – висоти сидіння, висоти спинки сидіння та кута нахилу спинки. Причому процес регулювання має бути нескладним. Не слід надмірно збільшувати кількість регульованих параметрів крісла, оскільки це позначатиметься на його стійкості. Для надання більшої стійкості та попередження перекидання при відхиленні тіла на спинку крісла у багатьох європейських країнах використовують стільці на п'яти ніжках.

Встановлення правильної висоти сидіння є першочерговим завданням під час організації робочого місця. Цей параметр визначає інші просторові параметри: висоту положення екрана, клавіатури, поверхні для записів тощо. Висота поверхні сидіння визначається висотою підколінної ямки над підлогою, виміряної у положенні сидючи при куті згинання коліна 90°. Висоту сидіння необхідно регулювати.

Конструкція робочого стільця (крісла) повинна забезпечувати підтримання раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій, створювати умови для зміни пози. З метою попередження втоми необхідно забезпечити зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової ділянки та спини.

Тип робочого стільця повинен обиратись залежно від характеру та тривалості роботи. Він має бути підйомно-поворотним і регулюватися по висоті та кутах нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від

переднього краю сидіння. Регулювання кожного параметра має бути незалежним і мати надійну фіксацію. Всі важелі та ручки пристосування (для регулювання) мають бути зручними в управлінні.

Висота поверхні сидіння повинна регулюватись у межах 400 - 550 мм. Ширина та глибина його поверхні має бути не менше як 400 мм. Поверхня сидіння має бути плоскою, передні краї – закругленими. Сидіння та спинка крісла мають бути напівм'якими, з неслизьким, таким, що не електризується та повітропроникним покриттям, матеріал якого забезпечує можливість легкого очищення від забруднення. Слід передбачити можливість зміни кута нахилу поверхні сидіння у межах від 15° уперед та 5° назад.

Опорна поверхня спинки стільця повинна мати висоту 280 - 320 мм, ширину – не менше як 380 мм та радіус кривизни горизонтальної площини – 400 мм. Кут нахилу спинки у вертикальній площині повинен регулюватися у межах ( $-30^\circ$ ) - ( $+ 30^\circ$ ) від вертикального положення. Відстань спинки від переднього краю сидіння повинна регулюватися у межах 260 - 400 мм.

З метою зниження статичного напруження м'язів рук доцільно використовувати стаціонарні або ті, що можна демонтувати підлокітники довжиною не менше як 250 мм, шириною у межах 50 - 70 мм, що мають регулюватися по висоті над сидінням у межах 200 - 260 мм та регулюватися по параметру внутрішньої відстані між підлокітниками у межах 350 -500 мм. В окремих випадках підлокітники доцільно виконувати у вигляді складового елемента робочого столу.

Під час організації робочого простору необхідно враховувати індивідуальні антропометричні параметри користувача з відповідними допусками на можливі зміни робочих поз та потребу у переміщеннях.

Рациональною робочою позою може вважатися таке розташування тіла, при якому ступні працівника розташовані на площині підлоги або на підставці для ніг, стегна зорієнтовані у горизонтальній площині, верхні частини рук – вертикально.

### 6.3 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

#### 6.3.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 6.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт, Іа

| Період року | Категорія робіт | Допустимі |       |        |
|-------------|-----------------|-----------|-------|--------|
|             |                 | t, °C     | W, %  | V, м/с |
| Теплий      | Легка<br>Іа     | 23-25     | 60-40 | 0,1    |
| Холодний    |                 | 22-24     | 60-40 | 0,1    |

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочоїзони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.
2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.
3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

#### 6.3.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем

підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в  $\text{мг/м}^3$ . [17].

Таблиця 6.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

| Найменування речовини | ГДК, $\text{мг/куб.м}$ |                | Клас небезпечності |
|-----------------------|------------------------|----------------|--------------------|
|                       | Максимально разова     | Середньодобова |                    |
| Пил нетоксичний       | 0,5                    | 0,15           | 4                  |

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню від нього. Тому необхідно здійснювати наступні заходи:

- очищувати пил якнайчастіше.
- щодня протирати гарячі поверхні.

Планувати прибирання так щоб вони приходилось на час, коли устаткування виключене.

### 6.3.3 Виробниче освітлення

В залежності від джерела світла промислове освітлення поділяється на:

- природне освітлення – освітленість приміщень світлом неба (прямого або відображеного), яке проникає через світлові пройми в зовнішніх огорожених конструкціях. По своєму спектральному складу воно є найбільш сприятливим. Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природної освітленості КПО ( $e_n$ ). Коефіцієнтом природної освітленості –

відношення природного освітлення, яке створюється в деякій точці заданої площини всередині приміщення світлом неба, до значення зовнішньої горизонтальної освітленості. КПО при природному та суміщеному освітленню.

Характеристика зорової роботи при виконанні - роботи високої точності;

Розряд - III;

Підрозряд зорової роботи - б;

Контраст об'єкту розпізнавання - середній;

Характеристика фону - темний;

Бокове КПО, %:

- природне 2,0;

- суміщене 1,2.

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КЕО для бічного і верхнього освітлення. Ті місця, що освітлюється тільки бічним світлом, нормується мінімальне значення КПО в межах робочої зони, що повинно бути забезпечене в точках, найбільше віддалених від вікна. Нормовані значення КПО для будинків визначаються за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n , \quad (461)$$

де  $e_n$  - значення КПО для будинків;

$m_n$ - коефіцієнт сонячності клімату - 0,85, вікна зорієнтовані на захід.

Природне:  $e_n = 2,0 \cdot 0,85 = 1,7 \%$ ,

суміщене:  $e_n = 1,2 \cdot 0,85 = 1,0 \%$ .

- штучне освітлення використовується двох систем: загальне або комбіноване. Загальне освітлення – освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення рівномірно або пристосувальне до

розташування обладнання Комбіноване освітлення – додаткове освітлення, при якому до загального освітлення додається ще й місцеве. Місцеве освітлення – освітлення, яке створюється світильниками, які концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях.

Штучне освітлення, лк:

загальне – 300 лк; комбіноване – 1000 лк.

#### 6.3.4 Виробничий шум

Рівень звука вимірюється в децибелах і визначається по формулі:

$$L = 20 \cdot \lg \left( \frac{P}{P_0} \right) = 20 \cdot \lg \left( \frac{U}{U_0} \right), \quad (6.2)$$

де  $L$  - рівень шуму, дБ;

$P$  - звуковий тиск, Па;

$U_0$  - коливальна швидкість,  $5 \cdot 10^{-8}$  м/с;

$P_0$  - нульове значення звукового тиску на нижньому порозі чутності в октавній смузі зі середньгеометричною частотою 1000 Гц, умовно прийняте рівним  $2 \cdot 10^{-5}$  Па.

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби

колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Таблиця 6.3–Рівень звукового тиску

| Характер робіт                                  | Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц |    |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                                                 | 32                                                                                                           | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| Постійні робочі місця в промислових приміщеннях | 107                                                                                                          | 95 | 87  | 82  | 78  | 75   | 73   | 71   | 69   |

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

### 6.3.5 Розрахунок захисного заземлення

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту

$$\rho_{\text{розр.}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot K_c, \quad (6.3)$$

де  $\rho_{\text{табл.}} = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – приблизні значення питомих електричних опорів різних ґрунтів та води,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$

$K_c = 1,3$  – коефіцієнт сезонності  $K_{\text{с.в.}}$ .

$$\rho_{\text{розр.}} = 40 \cdot 1,3 = 52 (\text{Ом} \cdot \text{м})$$

Визначаємо відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача :

$$H = H_0 + \frac{l_B}{2} \quad (6.4)$$

$$H = 0,7 + \frac{2,5}{2} = 1,95(\text{м})$$

Визначаємо опір розтікання струму в одному вертикальному заземлювачі:

$$R_B = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{l_B} \left( \lg \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4H + l_B}{4H - l_B} \right); \quad (6.5)$$

$$R_B = 0,366 \frac{52}{2,5} \left( \lg \frac{2 \cdot 2,5}{0,045} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5} \right) = 15,578 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо орієнтовну кількість вертикальних заземлювачів при  $\eta_B = 1$

де  $\eta_B$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів

$$n_{\text{ор}} = \frac{R_B}{R_d \cdot \eta_B} \quad (6.6)$$

$$n_{\text{ок}} = \frac{15,578}{4 \cdot 1} = 3,89; \text{ приймаємо } n_{\text{ок}} = 4 \text{ шт.}$$

Визначаємо коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів  $\eta_B$ , заземлювачі розташовані в ряд,  $a/l_B = 2, n = 4$ . Приймаємо  $\eta_B = 0,89$ .

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з врахуванням коефіцієнта використання:

$$n_B = n_{OP} / n_B ; \quad (6.7)$$

$$n_B = 4 / 0,89 = 3,56.$$

Приймаємо  $n_B = 4$  шт.

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму у вертикальних заземлювачах при  $n_B = 4$  без врахування з'єднувальної стрічки:

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{R_B}{n_B \cdot \eta_B} ; \quad (6.8)$$

$$R_{\text{розр.в.}} = \frac{15,78}{4 \cdot 0,89} = 4,43 (\text{Ом}).$$

Визначаємо довжину з'єднувальної стрічки:

$$L_c = 1,05 \cdot a(n-1); \quad (6.9)$$

$$L_c = 1,05 \cdot 5(4-1) = 15,75 (\text{м}).$$

За формулою (4.8) для горизонтальних електродів, розташованих в ґрунті, визначаємо опір розтікання струму:

$$R_{\Gamma} = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.}}}{L_c} \lg \frac{2 \cdot (L_c)^2}{H_0 \cdot B_c} ; \quad (6.10)$$

$$R_{\Gamma} = 0,366 \frac{52}{15,75} \lg \frac{2 \cdot (15,75)^2}{1,95 \cdot 0,045} = 4,534 .$$

Визначаємо коефіцієнт використання горизонтального заземлювача. при  $a = 2, n = 5$ . Приймаємо  $\eta_{\Gamma} = 0,79$ .

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму в горизонтальному заземлювачі з врахуванням  $\eta_{\Gamma}$ :

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{R_{\Gamma}}{\eta_{\Gamma}}; \quad (6.11)$$

$$R_{\text{розр.}\Gamma} = \frac{4,534}{0,79} = 5,73 \text{ (Ом)}.$$

Визначаємо розрахунковий опір розтікання струму заземлювального пристрою:

$$R_{\text{розр.}} = \frac{R_{\text{розр.В}} \cdot R_{\text{розр.}\Gamma}}{R_{\text{розр.В}} + R_{\text{розр.}\Gamma}}; \quad (6.12)$$

$$R_{\text{розр.}} = \frac{4,43 \cdot 5,73}{4,43 + 5,73} = 2,49 \text{ (Ом)};$$

Отриманий розрахунковий опір розтікання струму відповідає вимогам ПУЕ, ПТЕ та ПТБ.

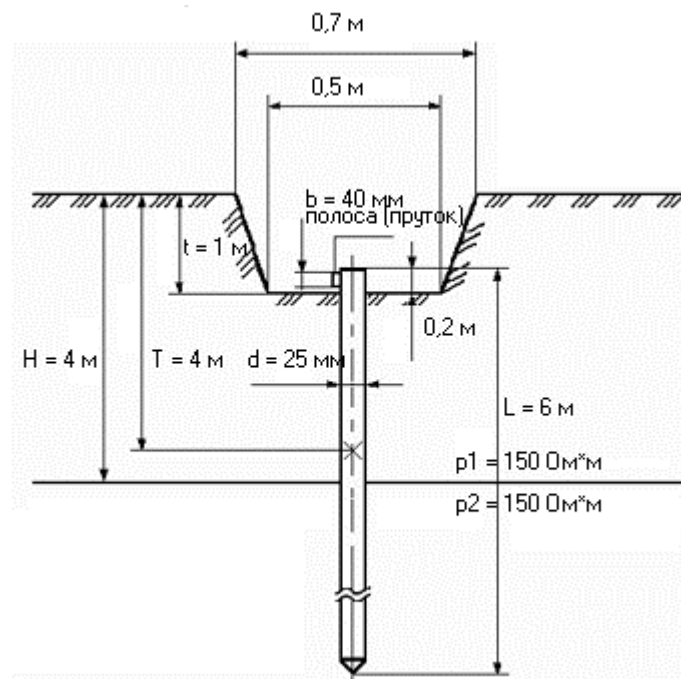


Рисунок 6.1 – Схема розміщення заземлювача в ґрунті

### **Висновки до розділу 6**

Виконання інструкцій з охорони праці та дотримання закону України з охорони праці дасть змогу забезпечити потрібні умови праці (шумозахист, освітлення) та зменшити аварійність та об'єктах енергетики.

## **7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**

### **7.1 Аналіз витрат та впровадження релейного захисту та окупність проекту**

Впровадження релейного захисту є критично важливим етапом у забезпеченні надійності роботи гідрогенератора. Аналіз витрат і оцінка окупності проекту включають розрахунок витрат на обладнання, встановлення, експлуатацію, а також оцінку економічних вигод від підвищення безпеки та запобігання аваріям.

#### **1) Витрати на впровадження релейного захисту**

Обладнання:

- Реле захисту (диференційні, максимального струму, частотні тощо).
- Трансформатори струму (ТС) і напруги (ТН).
- Допоміжне обладнання (кабелі, комунікаційні модулі).

Інсталяційні роботи:

- Монтаж реле та трансформаторів.
- Підключення до генератора та мережі.
- Інтеграція з автоматизованими системами управління (SCADA).

Проектування та налаштування:

- Розробка проектної документації.
- Налаштування порогових значень і алгоритмів роботи реле.

Експлуатаційні витрати:

- Регулярна діагностика та технічне обслуговування.
- Періодичне калібрування.

#### **2) Приблизна вартість (для 100 МВт)**

Стаття витрат Сума (грн)

- Обладнання (реле, ТС, ТН) 200 000 – 300 000 грн
- Монтажні роботи 50 000 – 80 000 грн
- Проектування і налаштування 100 000 – 200 000

- Інтеграція з SCADA 20 000 – 40 000 грн
- Загалом 300 000 – 470 000 грн

### 3) Економічні вигоди від впровадження

Аварії без належного захисту можуть спричинити значні витрати:

- Вартість ремонту генератора: 2 000 000 – 3 000 000 (залежно від масштабу пошкодження).

Втрати від простою:

- Припинення генерації 100 МВт потужності може призвести до втрати прибутку 300 000 – 3 000,000 на добу.

У разі серйозної аварії зупинка може тривати тижні або місяці.

Зниження експлуатаційних витрат:

- Сучасні мікропроцесорні реле дозволяють автоматизувати діагностику, скорочуючи витрати на персонал.
- Попередження аварій зменшує витрати на ремонт.

Підвищення терміну служби обладнання:

- Надійний захист забезпечує стабільні умови роботи генератора, зменшуючи знос компонентів.

### 4) Окупність проєкту

Розрахунок економії

Запобігання аваріям:

- Якщо релейний захист запобігає одній великій аварії за 10 років, економія може становити до 2,000 000.

Зменшення витрат на обслуговування:

- Сучасна система захисту скорочує експлуатаційні витрати на 20 000 – 30 000 щороку. За 10 років це складе 200 000 - 300000.

Підвищення надійності та доходу:

- Збільшення доступності генератора на 1% може принести додатковий дохід у розмірі 100 000 – 200 000 на рік.

Окупність

- Витрати на проєкт: 100 000 - 470 000.
- Середньорічна економія: 220000 - 300000.
- Термін окупності: до 5 років.

## **7.2 Економічний ефект від зниження аварійності та збільшення надійності обладнання**

Зменшення аварійності та підвищення надійності гідрогенератора 100 МВт має суттєвий економічний ефект. Цей ефект проявляється у зниженні витрат на аварійне обслуговування, збільшенні виробітку електроенергії, скороченні простоїв, а також у зменшенні екологічних і соціальних ризиків.

### ***Основні фактори економічного ефекту.***

#### **1) Зниження витрат на ремонт і технічне обслуговування**

- Запобігання великим аваріям знижує витрати на відновлення обладнання.
- Використання сучасного релейного захисту дозволяє оперативно локалізувати пошкодження та уникнути значних збитків.

Орієнтовна економія:

- Запобігання одній великій аварії може заощадити від 500000 грн до 3 000000 грн (залежно від масштабу пошкодження).
- Зменшення дрібних несправностей скорочує витрати на обслуговування на 20'000 грн - 50'000 грн щорічно.

#### **2) Збільшення виробітку електроенергії**

- Більш надійне обладнання зменшує час простоїв і забезпечує стабільне постачання електроенергії.

Ефект від зменшення простоїв:

- Кожна година простою 100 МВт гідрогенератора призводить до втрати прибутку близько 5'000 - 10'000 грн (залежно від тарифів).

- Якщо завдяки зростання надійності скорочуються простої на 100 годин на рік, це забезпечує додатковий дохід у розмірі від 500'000 до 1'000'000 на рік.

### 3) Зменшення втрат через хибні спрацьовування захисту

- Сучасні релейні системи мінімізують хибні спрацьовування, що скорочує незаплановані зупинки блоку.

Економічний ефект:

- Зменшення хибних зупинок може заощадити від 100'000 до 200'000 грн щорічно.

### 4) Скорочення експлуатаційних витрат

- Використання сучасного захисного обладнання дозволяє автоматизувати моніторинг і діагностику.

Орієнтовна економія:

- Скорочення витрат на персонал і технічну діагностику – від 20'000 - 30'000 грн на рік.

### 5) Запобігання екологічним і соціальним збиткам

- Аварії можуть призводити до екологічних катастроф (витік масла, пошкодження водойм), що супроводжуються штрафами та репутаційними втратами.

Економічний ефект:

- Уникнення штрафів і відновлювальних робіт може заощадити \$100'000 - 500'000 грн залежно від масштабу аварії.

*Розрахунок економічного ефекту.*

Загальний економічний ефект за рік :

- Фактор економії Орієнтовна економія (USD)
- Запобігання аваріям \$500,000 - \$3,000,000
- Додатковий виробіток через скорочення простоїв \$500,000 - \$1,000,000
- Зменшення хибних спрацьовувань \$100,000 - \$200,000
- Скорочення витрат на обслуговування \$20,000 - \$50,000

- Запобігання екологічним і соціальним збиткам \$100,000 - \$500,000
- Загальний ефект за рік \$1,220,000 - \$4,750,000

Інвестиції в релейний захист і модернізацію:

- Типовий проєкт для гідрогенератора 100 МВт коштує \$300,000 - \$470,000 (включаючи обладнання, монтаж і налаштування).

Окупність:

- За умови щорічного економічного ефекту у \$1,220,000 - \$4,750,000, термін окупності становить менше 1 року.

Підвищення конкурентоспроможності:

- Більш надійна робота обладнання покращує репутацію компанії на ринку енергопостачання.

Виконання регуляторних вимог:

- Надійний захист допомагає уникнути штрафів і санкцій від регуляторних органів.

Продовження терміну служби обладнання:

- Стабільні умови роботи зменшують знос компонентів генератора.

### **7.3 Вплив впровадження релейного захисту на енергоефективність та екологічну безпеку станції**

Впровадження сучасного релейного захисту позитивно впливає на енергоефективність та екологічну безпеку гідроелектростанції (ГЕС). Це зменшує втрати електроенергії, покращує стабільність роботи обладнання, запобігає аварійним ситуаціям і знижує ризики для навколишнього середовища.

#### **1) Вплив на енергоефективність**

Локалізація пошкоджень:

- Сучасний релейний захист швидко відключає пошкоджене обладнання, запобігаючи поширенню аварії на інші ділянки мережі. Це знижує втрати енергії через короткі замикання та перевантаження.

Підтримка стабільних параметрів:

- Забезпечення точного контролю напруги і частоти запобігає небажаним коливанням, які можуть призводити до зниження енергоефективності.

Скорочення простоїв:

- Сучасні системи релейного захисту мінімізують час простоїв через швидке виявлення та усунення аварійних ситуацій.
- Збільшення коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП) призводить до підвищення продуктивності ГЕС.

Ефективне управління навантаженням:

- Захист від перевантажень дозволяє оптимізувати роботу генератора та уникати додаткового зносу обладнання, що сприяє економії енергії.

2) Вплив на екологічну безпеку

Запобігання аварійним викидам:

- У разі аварій можливий витік технічних рідин (оливи, гідравлічних рідин), які можуть потрапити у водойми.
- Швидке виявлення і відключення пошкоджених компонентів захищає екосистеми від забруднень.

Зниження ризиків для гідрооб'єктів:

- Пошкодження обладнання або неправильно працюючий генератор можуть спричинити нестабільність роботи греблі чи водосховища.
- Релейний захист дозволяє запобігти перевантаженням, які можуть вплинути на структурну безпеку гідропоруд.

Екологічна відповідність:

- Встановлення сучасних захисних систем забезпечує відповідність нормам екологічної безпеки (ISO 14001, місцеві екологічні регламенти).

3) Додаткові переваги

Зменшення зносу обладнання:

- Релейний захист забезпечує роботу генератора в оптимальних умовах, зменшуючи механічний і тепловий знос. Це сприяє довготривалій експлуатації без аварій.

Покращення якості електроенергії:

- Стабільність напруги і частоти знижує коливання в мережі, що позитивно впливає на споживачів і зменшує втрати енергії під час передачі.

4) Розрахунок ефективності впровадження:

Економія завдяки підвищенню КВВП:

- Додатковий виробіток енергії через зменшення простоїв (10% скорочення):
- Потужність генератора: 100 МВт.
- Річний робочий час: 8760 годин.
- Додатковий виробіток:  $100 \text{ МВт} \times 876 \text{ годин} = 87,600 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ .
- При тарифі \$50 за МВт·год дохід зростає на \$4,380,000.

Зменшення витрат на ліквідацію аварій:

- Запобігання хоча б одній аварії за 10 років може заощадити \$1,000,000 - \$3,000,000.

5) Окупність інвестицій

- Інвестиції: 300 000 – 470 000 (встановлення релейного захисту).

Економічний ефект:

- Річна економія завдяки енергоефективності та екологічній безпеці — 1,000,000 - 5,000,000.
- Термін окупності: не більше 3 роки.

## **Висновки до розділу 7**

1. Зменшення аварійності та підвищення надійності гідрогенератора 100 МВт має суттєвий економічний ефект. Цей ефект проявляється у зниженні витрат на аварійне обслуговування, на збільшення виробітку

електроенергії, скороченні простоїв, а також у зменшенні екологічних і соціальних ризиків.

2. Запобігання великим аваріям знижує витрати на відновлення обладнання.

3. Використання сучасного релейного захисту дозволяє оперативно локалізувати пошкодження та уникнути значних збитків.



## ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу основних принципів побудови релейного захисту гідрогенераторів показано, що сучасні мікропроцесорні захисти поєднують а собі функції захисту, як гідрогенераторів від аварійних режимів так і від особливих, а також функції вимірювань, реєстраторів аварійних подій.
2. Дослідження типових режимів роботи гідрогенераторів свідчать про те, гідрогенератори експлуатуються в нормальних аварійних та після аварійних режимах, а також в особливих режимах.
3. Частими, під час експлуатації є однофазні замкнення на землю в обмотці статора.
4. Аналіз сучасних систем релейного захисту гідрогенераторів свідчить про те, що зараз використовуються комбіновані системи мікропроцесорного захисту як вітчизняного так і закордонного виробництва.
5. Визначені уставки спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт відповідають вимогам нормативних документів
6. Пораховані економічні показники впровадження мікропроцесорних захистів на ГЕС свідчать про очікуваний термін окупності до 3 років.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Релейний захист електроенергетичних систем: навч. посіб./ В. П. Кідиба. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 504 с.
2. Кутін В.М. Релейний захист та системна автоматика: лабораторний практикум / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 130 с.
3. Панченко С.В. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – Ч. 2. – 276 с.
4. Рубаненко О. Є. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 125с.
5. Рубаненко О. Є. Мікропроцесорний релейний захист ліній електропередач : лабораторний практикум / Рубаненко О. Є., Гончарук О. Ф., Рубаненко О. О. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 130 с. European Commission. "The European Green Deal." December 11, 2019.
6. Яндульський О. С. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання] : навч. посіб. / О. С. Яндульський, О. О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О. С. Яндульського. – К. : НТУУ «КПІ», 2016. –102 с.
7. Reimert, D. (2006). Protective Relaying for Power Generation Systems (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420030488>
8. Mishra, Debani Prasad, et al. "Enhancing the Performance of Reverse Power Relay for Generator Protection." *WSEAS Transactions on Power Systems* 16 (2021): 336-343.
9. Horowitz, Stanley H., Arun G. Phadke, and Charles F. Henville. *Power system relaying*. John Wiley & Sons, 2022.
10. Ram, Badri. *Power system protection and switchgear*. Tata McGraw Hill, 2022.
11. Pesente, Jonas, et al. "A Procedure To automate the assessment of generator

protection." *Electric Power Systems Research* 196 (2021): 107247.

12. Chen, Jun, Qingshan Xu, and Kai Wang. "Research and application of generator protection based on fiber optical current transformer." *IEEE Access* 8 (2020): 172405-172411.

13. Dehkordi, Ali B., et al. "Generator Protection Validation Testing Using a Real-Time Digital Simulator: Stator Winding Protection." *proceedings of the 48th Annual Western Protective Relaying Conference, Spokane, WA*. 2021.

14. Abd el-Ghany, Hossam A., Eman S. Ahmed, and Ahmed E. ELGebaly. "A reliable loss of excitation protection technique based on EPFA for synchronous generators." *IEEE Transactions on Power Delivery* 37.3 (2021): 1445-1455.

15. Elsadd, Mahmoud A., Wael Yousef, and Almoataz Y. Abdelaziz. "New adaptive coordination approach between generator-transformer unit overall differential protection and generator capability curves." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 118 (2020): 105788.

16. Zakri, Azriyenni Azhari, and Fahrul Rozi. "Modeling To Improve the Performance of Reverse Power Relay in Generator." *Sinergi* 24.3 (2020): 231-236.

17. Бондаренко Є. А., Кутін В. М., Лежнюк П. Д., Навчальний посібник до розділу «Охорона праці» в магістерських кваліфікаційних роботах для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка : навч. посібник Вінниця : ВНТУ, 2018. 120 с.

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

### ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: Релейний захист гідрогенераторів 100 МВт

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (вказати))

Підрозділ \_\_\_\_\_ Кафедра електричних станцій та систем \_\_\_\_\_

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник Рубаненко Олександр Євгенійович

(прізвище, ініціали, посада)

#### Показники звіту подібності

| Turnitin          |     |
|-------------------|-----|
| Оригінальність    | 88% |
| Загальна схожість | 12% |

#### Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ініціали)

#### Опис прийнятого рішення

---



---



---

Особа, відповідальна за перевірку \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вишневський С.Я  
(прізвище, ініціали)

Експерт \_\_\_\_\_  
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

**ДОДАТОК Б**  
**Технічне завдання МКР**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ЕСС  
д.т.н., професор Комар В. О.  
(наук. ст., вч. зв., ініц. та прізви.)

\_\_\_\_\_  
(підпис)  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_ 2024 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**  
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
Релейний захист гідрогенераторів 100 МВт  
08-13.МКР.020.00.004 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., проф.,  
професор кафедри ЕСС  
\_\_\_\_\_  
Рубаненко О.Є.  
Магістр групи 2ЕС-23м  
\_\_\_\_\_  
Мельник О.Л.

Вінниця 2024 р.

## **Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)**

а) Релейний захист (РЗ) є критичним для надійної та безпечної роботи енергосистем, особливо для потужних гідрогенераторів (100 МВт). Вдосконалення РЗ сприяє зменшенню аварійності, економічних втрат та підвищує стабільність енергомереж. Актуальність теми зумовлена високими вимогами до надійності енергообладнання в умовах зростання складності енергосистем. Застосування сучасних технологій, зокрема мікропроцесорних пристроїв захисту, забезпечує кращий контроль та швидке реагування на наступні ситуації.

б) наказ ректора ВНТУ №310 від 17 вересня 2024 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

### **2. Мета і призначення МКР**

а) мета – полягає в аналізі, розробці та вдосконаленні систем релейного захисту для гідрогенераторів потужністю 100 МВт з урахуванням їх конструктивних, технологічних і експлуатаційних особливостей..

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

### **3. Джерела розробки**

Список використаних джерел розробки:

1. Релейний захист електроенергетичних систем: навч. посіб./ В. П. Кідиба. – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. – 504 с.
2. Кутін В.М. Релейний захист та системна автоматика: лабораторний практикум / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 130 с.
3. Панченко С.В. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – Ч. 2. – 276 с.
4. Рубаненко О. Є. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О. О., Гунько І. О. – Вінниця : ВНТУ, 2023. 125с.

### **4. Технічні вимоги до виконання МКР**

Параметри гідрогенератора СВ-1500/170-96 90 (СВ-вертикальний синхронний генератор).  $S_H = 117.65$  МВА;  $P_H = 100$  МВт;  $U_H = 13,8$  кВ,  $I_H = 4,92$  кА;  $\cos \varphi = 0,85$ ,  $n_{об} = 62,5$  об/хв,  $OK3 = 1,75$ ,  $x_d^{II} = 0.21$ ,  $x_d^{II} = 0.21$ ,  $x_d^I = 0.29$ ,  $x_d = 0.65$ ,  $x_q^{II} = 0.23$ ,  $T_{d0} = 5,3$  сек,  $I_{f\text{ ном}} = 1795$  А,  $I_{f\text{ ном}} / I_{fX} = 1.75$ ,  $U_{f\text{ ном}} = 430$  В,  $K_f = 2.2$ .

## 5. Економічні показники

Визначити основні техніко-економічні показники доцільності впровадження сучасного мікропроцесорного захисту гідрогенераторів 100 МВт.

### 1. Етапи МКР та очікувані результати

| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи                                                         | Термін виконання |          | Очікувані результати                                                  |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------|
|       |                                                                                                           | початок          | кінець   |                                                                       |
| 1     | 2                                                                                                         | 3                | 4        | 5                                                                     |
| 1     | Розроблення технічного завдання                                                                           | 18.09.24         | 20.09.24 | формування технічного завдання                                        |
| 2     | Конструктивні та експлуатаційні особливості гідрогенераторів потужністю 100 МВт                           | 21.09.24         | 25.09.24 | аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ |
| 3     | Проектування системи релейного захисту для гідрогенераторів 100 МВт                                       | 26.09.24         | 26.10.24 | розділ 2                                                              |
| 4     | Види аварійних режимів роботи гідрогенераторів та їх вплив на надійність                                  | 27.10.24         | 1.11.24  | розділ 3                                                              |
| 5     | Проектування релейного блоку захисту генератор-трансформатор ГЕС з гідрогенератором типу СВ-1500/170-96 6 | 2.11.24          | 6.11.24  | розділ 4                                                              |
| 6     | Оцінка надійності та ефективності системи гідрозахисту гідрогенераторів 100 МВт                           | 7.11.24          | 10.11.24 | розділ 5                                                              |
| 7     | Заходи забезпечення надійної та безпечної експлуатації електроустановок                                   | 11.11.24         | 15.11.24 | розділ 6                                                              |
| 8     | Економічна частина                                                                                        | 16.11.24         | 20.11.24 | розділ 7                                                              |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки                                                                          | 21.11.24         | 24.12.24 | пояснювальна записка                                                  |
| 10    | Виконання графічної частини та оформлення презентації                                                     | 25.12.24         | 28.12.24 | презентація                                                           |

7. Очікувані результати В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи очікується одержання обґрунтованих рекомендацій та пропозицій, які можуть бути використані з метою підвищення ефективності застосування досліджуваного об'єкта та покращення енергоефективності.

8. Матеріали, що подаються до захисту МКР Пояснювальна записка МКР (паперовий екземпляр), ілюстративні матеріали, відгук наукового керівника, відгук опонента, анотації до МКР українською та іноземною мовами, протокол перевірки МКР на наявність текстових запозичень.

9. Порядок контролю виконання та захисту МКР Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником та завідувачем кафедри ЕСС згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні екзаменаційної комісії, затвердженої наказом ректора.

10. Вимоги до оформлення МКР Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:2, 2021 р.

11. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом Відсутні

**ДОДАТОК В**  
**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**

**РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВТ**

Студент \_\_\_\_\_  
( підпис ) ( ініціали та прізвище )

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис ) ( ініціали та прізвище )



Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики, електротехніки та  
електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

## РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ 100 МВТ

Мельник Олександр  
Леонідович,  
студент гр. 2ЕЕ-186

Керівник: к.т.н, проф  
Рубаненко Олександр  
Євгенійович

### Актуальність

2

РЗ є однією з найважливіших складових забезпечення надійної та безпечної роботи енергетичних систем. Особливе значення РЗ має у випадку гідрогенераторів великої потужності, таких як генератори потужністю 100 МВт, які є ключовими елементами енергетичних об'єктів. В умовах сучасного розвитку енергетики підвищення ефективності, точності та швидкодії релейного захисту гідрогенераторів сприяє зменшенню аварійності, мінімізації економічних втрат та підвищенню стабільності енергетичних мереж захисту.

Отже, тема магістерської кваліфікаційної роботи «Релейний захист гідрогенераторів 100 МВт» є актуальною.



### Мета і завдання роботи

3

**Мета** дослідження полягає в аналізі, розробці та у вдосконаленні систем релейного захисту гідрогенераторів потужністю 100 МВт з урахуванням їх конструктивних, технологічних і експлуатаційних особливостей..

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язуються такі **завдання**:

- 1.\_Розглянути основні принципи побудови релейного захисту гідрогенераторів,
- 2.\_Дослідити типові режими роботи,
- 3.\_ Дослідити можливі аварійні ситуації.
- 4.\_Проаналізувати сучасні системи релейного захисту гідрогенераторів
- 5.\_Визначити уставки спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт.
6. Визначити економічні показники впровадження мікропроцесорних захистів на ГЕС.

## Об'єкт, предмет дослідження, новизна

4

**Об'єктом** досліджень є процеси зміни струмів і напруг в гідрогенераторі 100 МВт в аварійних та особливих режимах експлуатації.

**Предметом** досліджень є захисти синхронних генераторів на електричних стаціях.

**Апробація.** Результати досліджень доповідались на конференціях ВНТУ.

**Новизна** отриманих результатів полягає в результатах аналізу особливостей електромеханічних та мікропроцесорних захистів гідрогенератора 100 МВт.

**Практична цінність** роботи полягає в результатах розрахунків уставок спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт



## Види захистів гідрогенератора

5



Siprotec 7U  
Siemens  
G60

REG 670(ABB)



Micom AGL  
General Electric



Micom AGL  
General Electric

## Конструктивні та експлуатаційні особливості гідрогенераторів

6

Гідрогенератор на 100 МВт — це потужна електрична машина, яка перетворює енергію водяного потоку на електричну енергію, використовуючи механічні та електромагнітні процеси. Принцип роботи гідрогенератора ґрунтується на перетворенні кінетичної та потенціальної енергії води в обертовий рух, генерує електроенергію за допомогою електромагнітної індукції..

### Конструктивні елементи гідрогенератора:

1) Турбіна: Вона приймає на себе енергію потоку води. Турбіна з'єднана з ротором генератора через вал. Найчастіше для потужних гідрогенераторів використовують реактивні турбіни, наприклад, капланові або пропелерні турбіни, що працюють при великому потоці і середніх напорах води.

2) Ротор (якір): Частина генератора, яка обертається і створює магнітне поле. Ротор має на собі обмотки або постійні магніти, які обертаються всередині статора. Від швидкості обертання ротора залежить частота вироблюваного змінного струму.

3) Статор: Нерухома частина гідрогенератора, в якій розташовані обмотки. Коли магнітне поле ротора перетинає обмотки статора, генерується електричний струм за принципом електромагнітної індукції.

## Конструктивні особливості гідрогенераторів

7

4) Вал: З'єднує турбіну з ротором і передає обертовий момент. Вал обертає ротор за рахунок енергії, що надходить від турбіни.

5) Система збудження: Забезпечує створення магнітного поля в роторі, використовуючи електромагніти або постійні магніти. У потужних гідрогенераторах застосовують складні системи автоматичного збудження для регулювання вироблення електроенергії.

6) Охолоджувальна система: Необхідна для відведення тепла, яке виділяється під час роботи генератора. Система охолодження використовує воду або повітря для підтримки оптимальної температури.

## Проектування релейного захисту блоку гідрогенератор-трансформатор

8

### Початкові дані. Параметри гідрогенератора

Параметри гідрогенератора СВ-1500/170-96 90 (СВ-вертикальний синхронний генератор).

$S_H = 117.65$  МВА;  $P_H = 100$  МВт;  $U_H = 13,8$  кВ,  $I_H = 4,92$  кА;  $\cos \varphi = 0,85$ ,  $n_{об} = 62,5$  об/хв,  $OK3 = 1,75$ ,  $x_d'' = 0,21$ ,  $x_d' = 0,21$ ,  $x_d = 0,29$ ,  $x_d = 0,65$ ,  $x_q'' = 0,23$ ,  $x_q = 0,59$ ,  $x_q' = 0,23$ ,  $x_q = 0,59$ ,  $x_2 = 0,22$ ,  $x_0 = 0,1$ ,  $T_{d0} = 5,3$  сек,  $I_{f ном} = 1795$  А,  $I_{f ном} / I_f = 1,75$ ,  $U_{f ном} = 430$  В,  $K_f = 2,2$ ,  $\eta = 97,5$  %,  $j = 80000$  т·м<sup>2</sup>·0,25.

Параметри трансформатора ТДЦ-125000/242-13,8:  $S_H = 125$  МВА;  $U_{BH} = 242$  кВ;  $U_{HH} = 13,8$  кВ;  $P_K = 120$  кВт,  $P_K = 380$  кВт,  $u_K = 11$  %,  $I_K = 0,25$  %.

## Розрахунок струмів КЗ

9

Для вибору уставок захисту розраховуємо струми КЗ для початкового моменту часу й у сталому режимі, а також зміну їх у процесі КЗ; у таблицях приведені параметри генератора і трансформатора.

Визначаємо поперечну зверхперехідну ЕРС обмотки статора:

$$E_q'' = \sqrt{(U_{ном} \cdot \cos \phi_{ном})^2 + (U_{ном} \cdot \sin \phi_{ном} + I_{ном} \cdot x_q'')^2}$$

$$\text{де } U_{ном} = I_{ном} = 1; \sin \phi_{ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{ном}} = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,55.$$

$$E_q'' = \sqrt{(1 \cdot 0,9)^2 + (1 \cdot 0,55 + 1 \cdot 0,23)^2} = 1,104.$$

Розраховуємо струми КЗ на затискачах генератора (точка К1)

$$I_1^{(3)} = E_q'' / x_q'' = 1,104 / 0,23 = 5,259;$$

$$I_2^{(2)} = E_q'' / (x_d'' + x_2'') = 1,104 / (0,21 + 0,22) = 2,568,$$

де  $x_2$  – опір оберненої послідовності генератора.

Значення струмів в іменованих одиницях:

$$I_1^{(3)} = I_1^{(3)} \cdot I_{f ном} = 5,259 \cdot 4,92 = 25,874 \text{ (кА)};$$

$$I_2^{(2)} = I_2^{(2)} \cdot I_{f ном} = 2,568 \cdot 4,92 = 12,634 \text{ (кА)}.$$

Розраховуємо струми КЗ за блочним трансформатором (точка К2).

$$I_1^{(3)} = E_q'' / (x_d'' + x_{0т}) = 1,104 / (0,21 + 0,0988) = 3,575;$$

$$I_2^{(2)} = E_q'' / (x_d'' + x_2'' + 2 \cdot x_{0т}) = 1,104 / (0,21 + 0,22 + 2 \cdot 0,0988) = 0,165;$$

$$I_2^{(1)} = E_q'' / (x_d'' + x_2'' + 2 \cdot x_{0т} + x_{0г}) = 1,104 / (0,21 + 0,22 + 2 \cdot 0,0988 + 0,088) = 0,145;$$

$$I_2^{(1,1)} = \frac{E_q''}{x_d'' + x_{0т} + \frac{(x_2'' + x_{0т}) \cdot x_{0т}}{x_2'' + x_{0т} + x_{0т}}} = 0,635.$$

### Захист від багатозазних КЗ в обмотці статора

10

Використовуємо повздовжній диференційний захист, застосовуємо трансформатори струму на лінійних виводах з коефіцієнтом трансформації 10000/5, а в нейтралі – 10000/5, для поперечного диференційного захисту – 1500/5; тоді робоча кількість витків обмотки реле  $W_{роб} = 64$  витка. Максимальне розрахункове значення первинного струму небаланса  $I_{нб. роз. макс}$  у встановленому режимі протікання через ТТ зовнішнього розрахункового максимального струму:

$$I_{нб. роз. макс} = \varepsilon \cdot K_{одн} \cdot I_{зовн. розр. макс} = 0.1 \cdot 1 \cdot 79.95 = 7.995 \text{ кА}$$

де  $K_{одн} = 1$ , оскільки трансформатори струму однакові. визначаємо робочу МРС при протіканні по робочій обмотці струму небалансу:

$$F_{роб} = \frac{K_{відстр} \cdot I_{нб. розр. макс} \cdot W_{роб}}{n_{тс}} = \frac{1.6 \cdot 7.995 \cdot 64}{2000} = 409.344 \text{ А витки}$$

визначаємо гальмівну МРС за виразом:

$$F_{гальм} = 136 \cdot \sqrt{\frac{F_{роб}^2}{100^2} - 1} = 136 \cdot \sqrt{\frac{409.344^2}{100^2} - 1} = 27.516 \text{ А витки}$$

Визначаємо значення вторинного гальмівного струму:

$$I_{гальм. втор} = \frac{I_{зовн. розр. макс}}{n_{тс}} = \frac{7.995}{2000} = 3.998 \text{ А}$$

### Захист обмотки статора від зовнішніх несиметричних КЗ

11

Застосовується струмовий захист зворотньої послідовності з інтегрально-залежною витримкою часу. Він виконується одним реле струму зворотньої послідовності з фільтром – РТФ-6М. Це реле складається з п'яти елементів:

- 1) пусковий орган без витримки часу, який забезпечує пуск та повернення інтегрального органу та блокування органу “відсічка 2”

$$I_{сз.по} = 0.1 \cdot I_{г.ном} = 0.1 \cdot 10.2 = 1.02 \text{ кА.}$$

- 2) інтегральний орган з інтегрально-залежною витримкою часу, який забезпечує правильну роботу захисту при зміні струму зворотньої послідовності і охолодженні ротора після усунення перевантаження

$$t_{зоп} = \frac{A}{I_{г.2\alpha}^2} = \frac{8}{2.576^2} = 1.206 \text{ с}$$

- 3) “Відсічка 1” спрацьовує без витримки часу і передбачається для дії захисту з незалежною витримкою часу в якості резервного захисту від зовнішніх несиметричних КЗ

### Захист від багатозазних КЗ в обмотці статора

12

- 4) “Відсічка 2” спрацьовує без витримки часу і передбачається для резервування швидкодіючих захистів ТТ з незалежною витримкою часу, і утворюється виносним реле часу

$$I_{сз.відс.2} = \frac{I_{г.2}^{(2)}}{K_{\alpha}} = \frac{18.039}{1.2} = 15.033 \text{ кА}$$

- 5) Сигнальний орган спрацьовує без витримки часу і передбачається для фіксації з незалежною витримкою часу недопустимого несиметричного навантаження генератора

$$I_{сз.сигн} = 0.05 \cdot I_{г.ном} = 0.05 \cdot 10.2 = 0.51 \text{ кА}$$

## Економічні розрахунки

13

Впровадження релейного захисту є критично важливим етапом у забезпеченні надійності роботи гідрогенератора. Аналіз витрат і оцінка окупності проекту включають розрахунок витрат на обладнання, встановлення, експлуатацію, а також оцінку економічних вигод від підвищення безпеки та запобігання аваріям.

### Основні фактори економічного ефекту

- 1) Зниження витрат на ремонт і технічне обслуговування
  - Запобігання великим аваріям знижує витрати на відновлення обладнання.
  - Використання сучасного релейного захисту дозволяє оперативно локалізувати пошкодження та уникнути значних збитків.
- Орієнтовна економія:
  - Запобігання одній великій аварії може заощадити від 500000 грн до 3 000000 грн (залежно від масштабу пошкодження).
  - Зменшення дрібних несправностей скорочує витрати на обслуговування на 20'000 грн - 50'000 грн щорічно.
- 2) Збільшення виробітку електроенергії
  - Більш надійне обладнання зменшує час простоїв і забезпечує стабільне постачання електроенергії.

## Висновки

14

1. На основі аналізу основних принципів побудови релейного захисту гідрогенераторів показано, що сучасні мікропроцесорні захисти поєднують а собі функції захисту, як гідрогенераторів від аварійних режимів так і від особливих, а також функції вимірювань, реєстраторів аварійних подій.
2. Дослідження типових режимів роботи гідрогенераторів свідчать про те, гідрогенератори експлуатуються в нормальних аварійних та після аварійних режимах, а також в особливих режимах, а також в піковому режимі добового графіку навантаження електроенергетичної системи.
3. Частими, під час експлуатації є однофазні замкнення на землю в обмотці статора.
4. Аналіз сучасних систем релейного захисту гідрогенераторів свідчить про те, що зараз використовуються комбіновані системи мікропроцесорного захисту як вітчизняного так і закордонного виробництва.
5. Визначені уставки спрацювання захистів гідрогенератора 100 МВт відповідають вимогам нормативних документів
6. Пораховані економічні показники впровадження мікропроцесорних захистів на ГЕС свідчать про очікуваний термін окупності до 3 років.

## Апробація результатів та публікації

15

Основні наукові результати опубліковані у тезах доповідей конференцій ВНТУ.