

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Управління електричними процесами

(назва факультету)

Інтелектуальні системи енергопостачання

(повна назва кафедри)

1. Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему: Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі  
27.5 кВ на якість електроенергії

за освітньою програмою Електротехнічні системи електроспоживання

зі 141 Електроенергетика, електроенергетика та

спеціальності: електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ЕС2121

(підпис студента)

Євгеній СИНЯВСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

(підпис)

Доцент Віталій ЛЯЦУК

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

(підпис)

доцент Віталій ПЕРЦЕВИЙ

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з  
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

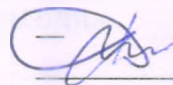
(підпис)

Дніпро – 2022

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними процесами  
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання  
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)  
Освітня програма: Електротехнічні системи електроспоживання  
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ ІСЕ

 \_\_\_\_\_ Дмитро БОСИЙ

Дата 05.05.22

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістр з електротехнічних систем  
електроспоживання

студенту СИНЯВСЬКОМУ Євгенію Станіславовичу

1. Тема роботи: “Розробка технічних засобів, які застосовують при  
діагностуванні тягового агрегату”.

Керівник роботи: Ляшук Віталій Михайлович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

" 14 " 04 2022 р. № 318ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Схема типових підстанцій.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз мікропроцесорних пристроїв захисту.

4.2 Аналіз сучасного обладнання мікропроцесорного захисту.

4.3. Удосконалення алгоритму роботи мікропроцесорного захисту

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схеми мікропроцесорних захистів. 2. Схеми тягових підстанцій. 3. Моделі різних схем живлення фідерної зони. Дослідження поведінки сталої часу. 3. Модель типової тягової підстанції. Результати дослідження поведінки сталої часу з впливом фільтр-пристроїв. Аналіз алгоритму покращення мікропроцесорного захисту.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                           | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Розробка технічних засобів для підвищення надійності роботи тягового агрегату | 04.10.2022                    | 35 %     |
| 2     | Аналіз несправностей і пошкоджень тягових агрегатів                           | 27.10.2022                    | 30 %     |
| 3     | Методи діагностування стану тягових агрегатів                                 | 20.11.2022                    | 30 %     |
| 4     | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри                                     | 12.12.2022                    | 5 %      |

Студент

(підпис)

Євгеній СИНЯВСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Віталій ЛЯШУК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## ЗМІСТ

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                            | 7  |
| 1 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТЯГОВОГО АГРЕГАТУ.....                  | 10 |
| 1.1 Дослідження можливості використання мікропроцесорної техніки для захисту випрямного агрегату..... | 10 |
| 1.2 Способи підтримки нормальної якості електроенергії .....                                          | 17 |
| 1.3 Вдосконалення існуючих систем електропостачання.....                                              | 22 |
| 2 АНАЛІЗ НЕСПРАВНОСТЕЙ І ПОШКОДЖЕНЬ ТЯГОВИХ АГРЕГАТІВ .....                                           | 29 |
| 3 МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ТЯГОВИХ АГРЕГАТІВ.....                                                  | 37 |
| 3.1 Перетворювальний агрегат .....                                                                    | 37 |
| 3.2 Алгоритм діагностування стану тягового трансформатора.....                                        | 39 |
| 3.3 Випробування індукованою напругою .....                                                           | 48 |
| 3.4 Методи випробування напівпровідникових приладів .....                                             | 53 |
| 3.5 Апаратурний контроль залишкового ресурсу трансформатора .....                                     | 57 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                         | 62 |
| СПИСОК БІБЛОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                     | 63 |

|           |      |                |                                                                                     |       |                                                                                   |                  |      |         |  |
|-----------|------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------|------|---------|--|
|           |      |                |                                                                                     |       | 15. 02.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ                                                        |                  |      |         |  |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис                                                                              | Дата  | Розробка технічних засобів, які застосовують при діагностуванні тягового агрегату | Літ.             | Арк. | Акрушіє |  |
| Розробник |      | Синявський Є.С |  | 19.12 |                                                                                   |                  | 6    | 64      |  |
| Керівник  |      | Ляшук В.М      |  | 19.12 |                                                                                   | УДУНТ. гр.ЕС2121 |      |         |  |
|           |      | Босиш'єв       |  | 19.12 |                                                                                   |                  |      |         |  |
| Н. контр. |      | Перегелін      |  | 19.12 |                                                                                   |                  |      |         |  |

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 60 сторінок, складається з 3 розділів, та містить 11 ілюстрацій, 3 таблиць, 10 бібліографічних джерел.

В даному дипломному проєкті проведений дослідження можливості використання мікропроцесорної техніки для захисту випрямного агрегату.

Здійснено огляд несправностей і пошкоджень тягових агрегатів. Було доведено доцільність використання вентилів на великі струми і зворотні напруги, що дозволить створити перетворювальні агрегати підвищеної надійності.

Розглянуті методи діагностування стану тягових агрегатів.

**Ключові слова:** РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ІНТЕГРАЛЬНІ СХЕМИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ, ТРАНСФОРМАТОРИ, ВИПРЯМНА УСТАНОВКА, ВЕНТИЛЬ.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## ВСТУП

### Актуальність роботи.

Сьогодні найбільш актуальним завданням є ремонт і відновлення працездатності пристроїв електропостачання, багато з яких вже вичерпали встановлений ресурс, морально і фізично застаріли. Особливо несприятливе положення склалося на устаткуванні тягових і трансформаторних підстанціях. Аналіз показав, що частка пошкоджень, пов'язаних із старінням і зносом її основних елементів, неухильно росте. Тому для ефективної роботи тягових підстанцій потрібна комплексна модернізація. Основні зусилля повинні бути направлені на заміну застарілого устаткування, при неможливості його заміни – вживання заходів по збільшенню терміну служби устаткування.

Особлива увага була загострена на методику визначення майбутнього місця короткого замикання тягового трансформатора без зняття робочої напруги.

Використовується методика неруйнівного випробування стану ізоляції шляхом вимірювання частоти резонансу контура – індуктивність обмотки та ємністю, через яку подається напруга з генератора.

Реалізація наявних технічних рішень дозволить істотно поліпшити і здешевити технологічний процес ремонту, обслуговування тягової підстанції і продовжити термін експлуатації устаткування.

В енергетичних системах неминучі різні пошкодження як основного, так і допоміжного устаткування. Найбільш небезпечне короткі замикання. Тому вживають заходів для можливо швидкого відключення пошкодженої ділянки і ліквідації наслідків аварійного режиму.

Функції по виявленню коротких замикань, визначенню їх місця і формуванню імпульсу на відключення покладають на спеціальну групу пристроїв проти аварійної автоматики — релейний захист. В загальному випадку функція захисту значно ширше: вона повинна безперервно стежити за всіма відхиленнями режиму

|      |     |          |        |      |                            |     |
|------|-----|----------|--------|------|----------------------------|-----|
|      |     |          |        |      | 15. 02.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк |
|      |     |          |        |      |                            | 7   |
| Змн. | Арк | № докум. | Підпис | Дата |                            |     |

від номінального і подавати сигнал персоналу або імпульс на відключення залежно від ступеня відхилення режиму від нормального.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Мета і завдання роботи** – Метою роботи є розробка системи заходів, направлених на підвищення надійності роботи електричного обладнання.

**Об'єкт дослідження** – тягова мережа постійного струму.

**Предмет дослідження** – методика визначення майбутнього місця короткого замикання тягового трансформатора без зняття робочої напруги.

**Методи дослідження** – Використовується методика неруйнівного випробування стану ізоляції шляхом вимірювання частоти резонансу конура – індуктивність обмотки та ємністю, через яку подається напруга з генератора.

**Наукова новизна та основні положення, які виносять на захист.**

В даній дипломній роботі розглянуто виявлення коротких замикань, визначенню їх місця і формуванню імпульсу на відключення покладають на спеціальну групу пристроїв проти аварійної автоматики — релейний захист. В загальному випадку функція захисту значно ширше: вона повинна безперервно стежити за всіма відхиленнями режиму від номінального і подавати сигнал персоналу або імпульс на відключення залежно від ступеня відхилення режиму від нормального.

**Практичне значення отриманих результатів.** Особлива увага була загострена на методику визначення майбутнього місця короткого замикання тягового трансформатора без зняття робочої напруги. Використовується методика неруйнівного випробування стану ізоляції шляхом вимірювання частоти резонансу конура – індуктивність обмотки та ємністю, через яку подається напруга з генератора.

|      |     |          |        |      |                            |     |
|------|-----|----------|--------|------|----------------------------|-----|
|      |     |          |        |      | 15. 02.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк |
|      |     |          |        |      |                            | 7   |
| Змн. | Арк | № докум. | Підпис | Дата |                            |     |

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Доцільно оцінювати напрацювання на відмову по електроенергії, що переробляється агрегатом. Такий підхід перспективний також для агрегатів тягових підстанцій, повністю автоматизованих, без чергового персоналу.

### **Публікації.**

У. "Development of technical means used in diagnostics of the traction unit". Syniavskyi /Транспортна інженерія [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 14 міжнародна науково-практична конференція студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», яка проводилась Львівським інститутом Українського державного університету науки і технологій 08 грудня 2022 р. – Львів, 2022. – 140-141 с.

|      |     |          |        |      |                            |     |
|------|-----|----------|--------|------|----------------------------|-----|
|      |     |          |        |      | 15. 02.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк |
|      |     |          |        |      |                            | 7   |
| Змн. | Арк | № докум. | Підпис | Дата |                            |     |

# 1 РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ТЯГОВОГО АГРЕГАТУ

## 1.1 Дослідження можливості використання мікропроцесорної техніки для захисту випрямного агрегату

В енергетичних системах неминучі різні пошкодження як основного, так і допоміжного устаткування. Найбільш небезпечне короткі замикання. Тому вживають заходів для можливо швидкого відключення пошкодженої ділянки і ліквідації наслідків аварійного режиму.

Функції по виявленню коротких замикань, визначенню їх місця і формуванню імпульсу на відключення покладають на спеціальну групу пристроїв проти аварійної автоматики — релейний захист. В загальному випадку функція захисту значно ширше: вона повинна безперервно стежити за всіма відхиленнями режиму від номінального і подавати сигнал персоналу або імпульс на відключення залежно від ступеня відхилення режиму від нормального.

Для виконання своїх функцій захист повинен бути чутливим, селективним, швидкодіючим і надійним. Крім того, до нього пред'являють вимоги відносно потужності, споживаної від вимірювальних трансформаторів, вартості, габаритів, маси і ін.

Сучасний релейний захист виконується на електромеханічних і напівпровідникових реле. Швидкий розвиток обчислювальної техніки і її елементної бази створив передумови для розробки і створення досконаліших пристроїв автоматики і релейного захисту з застосуванням цієї техніки. Особливі можливості для створення захистів відкриваються з розвитком інтегральної технології виготовлення схем.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Тут передусім слід мати на увазі операційні підсилювачі, компаратори і інші елементи обчислювальної техніки в інтегральному виконанні.

Застосування інтегральних схем дозволяє створювати захисти з високими показниками по швидкодії, селективності, чутливості і надійності, знижувати масу і габарити апаратури, а також споживання потужності від вимірювальних трансформаторів.

На основі інтегральних схем можуть бути розроблені багатофункціональні пристрої захисту і окремі реле, володіючи особливими характеристиками, які важко і деколи неможливо отримати у електромеханічних і напівпровідникових пристроїв на дискретних компонентах.

Інтегральний операційний підсилювач є універсальним елементом, що широко використовується в радіотехніці, цифрових і аналогових обчислювальних машинах і інших пристроях. Ця універсальність забезпечує широкий попит на ці елементи і відповідно масове їх виробництво, обчислюване мільйонами штук. Масовість випуску визначає малу вартість як самих інтегральних схем, так і апаратури, розробленої на їх основі.

Все це дає підставу вважати, що інтегральні схеми знайдуть найширше застосування в ланцюгах автоматики і релейного захисту енергетичних систем і, отже, розробці подібних пристроїв повинна надаватися найбільша увага.

Термін «релейний захист» склався давно і відображає факт виконання захисту на основі реле. Побудова захисту на іншій елементній основі неначе не дає права називати захист релейним. Але застосування терміну просто «захист» без слова «релейний» вносить деяку невизначеність щодо області його використання. В електроенергетичних системах під релейним захистом розуміють захист устаткування в основному від коротких замикань. Термін «захист» значно ширше і включає всі види захисту, а не тільки ті, які традиційно входять в область релейного захисту.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Застосування нової елементної бази не міняє принципу дії захисту (струмова, диференціальна, дистанційна і т. д.). В той же час нова елементна база відкриває широкі можливості до вдосконалення захисту.

Час дії захисту лежить в межах одного або декількох періодів змінного струму промислової частоти. Протягом цього часу в об'єкті і в елементах захисту йдуть перехідні процеси, що супроводяться появою вільних складових в струмах і напругах. Останні істотно впливають на поведінку захисту.

Переважає більшість видів захисту виявляє відхилення основної гармоніки струму і напруги 50 Гц. При цьому вільні складові у вигляді субгармонік, вищих гармонік і аперіодичних складових є перешкодою і можуть викликати помилкове спрацювання захисту. З урахуванням цього частотній фільтрації сигналів надається найпильніша увага.

Традиційно в книгах по релейному захисту розглядаються пристрої захисту всього основного устаткування електричних станцій, підстанцій і лінії передачі. Що стосується захисту на базі обчислювальної техніки, то сьогодні її ще немає для всіх видів основного устаткування енергетичних систем. Різними організаціями ведуться лише інтенсивні розробки цих видів захисту.

Розвиток сучасних пристроїв релейного захисту останніми роками характеризується широким застосуванням інтегральних мікросхем при розробці нових виробів.

По конструктивно-технологічній ознаці інтегральні схеми підрозділяються на напівпровідникові (монолітні) і гібридні (плівкові). Найбільше розповсюдження в різних пристроях автоматики отримали схеми першого типу.

По функціональному призначенню інтегральні схеми діляться на два великі класи: логічні (цифрові) і лінійно-імпульсні (аналогові). Логічні інтегральні схеми оперують з інформацією в дискретній двійковій формі. Активні елементи логічних схем працюють в ключовому режимі. Аналогові схеми оперують з інформацією, що представляється безперервними функціями

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

струмів і напруг. Активні елементи аналогових схем працюють в лінійному режимі або здійснюють нелінійне перетворення вхідних сигналів.

Напівпровідникові і гібридні інтегральні схеми діляться по ступеню інтеграції на чотири групи. Першу групу складають інтегральні схеми з малим ступенем інтеграції, що містить до 10 компонентів в одному корпусі.

До цієї групи відносяться, наприклад, прості логічні елементи, диференціальні підсилювальні каскади, діодні і транзисторні складки.

Другу групу складають інтегральні схеми з середнім ступенем інтеграції, що містить від 10 до 100 різних компонентів в одному корпусі. До них відносяться, наприклад, тригери, регістри, суматори, операційні підсилювачі, комутатори.

Третю групу складають так звані великі інтегральні схеми (БІС), ступінь інтеграції яких складає від 100 до 1000 компонентів. До цієї групи відносяться напівпровідникові пристрої, що запам'ятовують і арифметико-логічні. Підвищення рівня інтеграції дозволяє значно поліпшити об'ємно-масові показники; понизити вартість з розрахунку на один функціональний елемент; ускладнити функції, виконувані мікросхемою. Збільшення ступеня і функціональної складності інтегральних схем приводить до зменшення числа з'єднань в блоках, скороченню довжини з'єднань між елементами, що, у свою чергу, дозволяє підвищити надійність і швидкодію апаратури.

Інтегральні схеми, що містять більше 1000 компонентів, відносяться до четвертої групи і називаються надвеликими (СБІС). Ця група включає мікропроцесори, однокристальні мікро-ЕОМ, аналого-цифрові перетворювачі.

В даний час при проектуванні пристроїв релейного захисту найширше застосування знайшли інтегральні логічні і аналогові схеми першої і другої груп. Ведуться дослідження у напрямі застосування схем третьої і четвертої груп.

До числа основних компонентів, що використовуються як основа для великого числа вузлів автоматичних пристроїв різного функціонального

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 10   |

призначення, відносяться логічні інтегральні мікросхеми і операційні підсилювачі.

Надійність будь-якого радіоелектронного приладу за інших рівних умов залежить від числа елементів. Чим їх менше, тим надійніше прилад. З цієї точки зору доцільність застосування різного роду пристроїв управління, захисти і т.п. потрібно ретельно зважувати. Адже будь-який пристрій захисту, наприклад, у свою чергу, володіє кінцевою надійністю, і його використання доцільне далеко не завжди.

Розглянемо цю, проблему докладніше. Почнемо із струмового захисту. Як відомо, розрізняють два види такого захисту: від перевищення максимально допустимого струму навантаження і від короткого замикання шин живлення. Взагалі кажучи, захист від перевищення струму переважно, але вона припускає включення в силовий ланцюг датчика струму, на якому в номінальному режимі падає приблизно 0,5 В (для звичайного транзисторного пристрою захисту) і розсіюється значна потужність, а це знижує КПД.

Пристрої захисту від короткого замикання реагують на зниження вихідної напруги. При короткому замиканні шин живлення напруга на них різко падає, що і приводить до спрацьовування пристрою захисту і відключення стабілізатора. Проте з моменту замикання і аж до відключення стабілізатора через регулюючий транзистор протікає струм, у декілька разів перевищуючий номінальний.

Особливо потрібно відзначити, що будь-хто, навіть самий вчинений пристрій струмового захисту (як від короткого замикання, так і від перевантаження) спрацьовує із затримкою, обумовленою його інерційною і необхідністю блокування на час зарядки конденсаторів фільтра і завершення перехідних процесів. Тому в початковий момент перевантаження струм через регулюючий транзистор зростає у декілька разів. Зрозуміло, якщо йдеться про захист від перевищення струму, величина перевантаження і її тривалість менше ніж при використуванні захисту від короткого замикання.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Не простіше йде справа і із захистом від перенапружень (збільшення вихідної напруги понад максимально допустиму). По складності такий пристрій майже не поступається самому стабілізатору, оскільки обов'язково містить джерело зразкової напруги, компаратор і виконавський елемент. Отже, його надійність можна прирівняти до надійності стабілізатора, що не може не понизити загальну надійність. Але справа не тільки в цьому. Поріг спрацьовування пристрою захисту від перенапружень завжди вище за максимально допустиму вихідну напругу, а значить, немає повної гарантії, що БІС не вийдуть з ладу через його перевищення.

Крім того, через інерційну пристрій не реагує на дуже короткочасні сплески напруги, а вони цілком можуть встигнути вивести БІС з ладу. В той же час не можна зовсім виключити помилкові спрацьовування такого пристрою захисту від наведення або імпульсної перешкоди, що приводить до знеструмлення комп'ютера і втрати інформації, що зберігається в ньому.

Розглядаючи доцільність введення захисту від перенапружень, потрібно урахувати вірогідність і характер аварійного підвищення вихідної напруги стабілізатора. Воно може вийти за встановлену межу або при порушенні режиму стабілізації, або при пробі регулюючого транзистора. Поза сумнівом, що вірогідність подібної аварії можна звести до мінімуму підвищенням надійності самого стабілізатора напруги.

Слід також мати на увазі, що в правильно спроектованому стабілізаторі з безперервним регулюванням різниця між вихідною і вхідною напругами не перевищує декількох вольт, тоді як в стабілізаторах з імпульсним регулюванням напруга випрямляча в 2...3 рази вище вихідного. При пробі регулюючого транзистора стабілізатора з імпульсним регулюванням напруга живлення зростає у декілька разів, що неминуче виведе з ладу комп'ютер, а при аварії стабілізатора з безперервним регулюванням — на ті ж декілька вольт, та і вірогідність пробою регулюючого транзистора в такому стабілізаторі нижче.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 12   |

Таким чином, можна зробити висновок, що в стабілізаторах напруги з імпульсним регулюванням застосування пристроїв захисту від перенапружень виправдано, а в стабілізаторах з безперервним регулюванням, достатньо обмежитися заходами по підвищенню загальної надійності блоку живлення. Єдине, що, можливо, має сенс зробити, — це включити на виходах стабілізаторів стабілітрони середньої потужності Д815А (в каналах +5 і —5 В) і Д815Е (в каналі +12 В), підібравши в першому випадку екземпляри з напругою стабілізації 5,5...6 В. При аварії стабілітрони обмежать кидок вихідної напруги.

Як відомо, для комп'ютерів, допустима пульсації живлячої напруги амплітудою декілька десятків мілівольт, що без особливої скрути забезпечують навіть найпростіші стабілізатори. Проте потрібно урахувати, що амплітуда пульсації випрямляча впливає на їх КПД

В блоках живлення ЕОМ нерідко вживають спеціальних заходів по організації безперебійного живлення, оскільки навіть короткочасне зникання напруги веде до порушення їх нормальної роботи. Проте безперебійне живлення дається дорогою ціною: різко зростає маса і габарити блоку живлення за рахунок акумуляторів, що використовуються як буфер, або накопичувальних конденсаторів. Нескладний розрахунок показує, що при перервах в живленні більше 1с для МПК необхідний накопичувальний конденсатор місткістю приблизно 1 Ф.

Узагальнюючи сказане, можна сформулювати наступні вимоги до блоку живлення. Він повинен забезпечувати на виході напруги —5 В при струмі навантаження 0...0,1 А (перший канал), Т-12 В при струмі 0...0,2 А (другий канал) і +5 В при струмі 0...1 А (третій канал). Органи регулювання повинні забезпечувати зміну вихідної напруги в межах  $\pm 10\%$ . Всі канали повинні бути захищені від коротких замикань, а третій, крім того, повинен мати захист від перевантаження по струму, з порогом спрацьовування 1,25...1,5 А. При включенні напруга —5 В повинне подаватися на комп'ютер першим. при

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 13   |

виключенні всі напруги повинні зніматися одночасно. У разі зникання будь-якої з напруги всі інші повинні зніматися автоматично. Нарешті, надійність блоку живлення повинна бути максимально можливою.

## 1.2 Способи підтримки нормальної якості електроенергії

Для підтримки нормальної якості електроенергії використовуються перетворювачі з плавним безконтактним регулюванням напруги, для яких випускають трансформатори і керовані реактори, які включають у відпаювання мережних обмоток. За допомогою цих апаратів здійснюється плавне безконтактне регулювання фазної напруги в діапазоні від  $U_{2ф}$  до  $1,2U_{2ф}$ . До трансформаторів ТДПУ 20000/10ЖУ1 або ТДПУ-20000/35ЖУ1 можна підключати випрямлячі з схемою з'єднання дві зворотні зірки із зрівняльним реактором (ПВЕ-3, ПВЕ-5), а до трансформатора типу ТДП 16000/10 ЖУ1 — випрямлячі, зібрані по трифазній мостовій схемі (ПВЕ-3М, ПВЕ-5АУ1). В режимах випрямлення і інвертування до цих трансформаторів можуть підключатися випрямно-інверторні перетворювачі ВІПЕ-2.

Регулювання напруги (рис.2.1) здійснюється пристроєм автоматики залежно від напруги на шинах підстанції (датчик напруги ДН) і струму агрегату (датчик струму ДС). Схема автоматики, регулююча струм підмагнічування керованих реакторів, розміщується в окремій шафі, її виконують на магнітних підсилювачах (шафа ШАУН) або тиристорах (ШАУНТ).

Коефіцієнт потужності і к.п.д.  $\eta$  агрегату сильно залежать, особливо при малих струмах навантаження, від співвідношення струмів підмагнічування керованих реакторів УР1 і УР2. При номінальному навантаженні випрямного перетворювача і характеристики, стабілізованій на рівні 3 800 В  $\eta \approx 97\%$ ,  $\cos \varphi = 0,9$ .

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 14   |

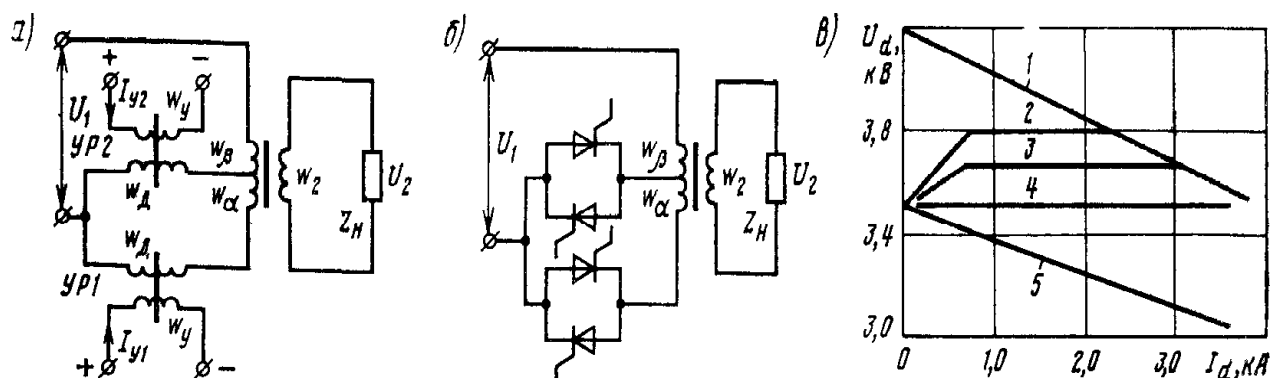


Рисунок 1.1 Принципова схема безконтактного регулювання напруги керованими реакторами (а) і стрічно-паралельно включеними тиристорами (б); зовнішні характеристики агрегату (в)

Кожна мережна обмотка(рис.2.1.а) складається з основної і регулювальної частин з числом витків відповідно  $w_\beta$  і  $w_\alpha$ . До відведень регулювальної обмотки підключені по схемі моста два керовані реактори УР1 і УР2 опір яких залежить від протікаємих в обмотках управління  $w_y$  струмів намагнічення  $I_{y1}$  і  $I_{y2}$ .

Безконтактне регулювання випрямленої напруги керованими реакторами, включеними у відпаювання мережної обмотки, здійснюється шляхом підмагнічування одного керованого реактора і розмагнічування іншого. При повному намагніченні УР1 (опір його мінімальний) і повному розмагнічуванні УР2 (опір його максимальний) напруга живлячої мережі прикладається до максимального числа витків трансформатора — регулювальна обмотка введена. Трансформатор в цьому режимі має найбільший коефіцієнт трансформації, і вторинна напруга його мінімальна. При розмагнічуванні УР1 і одночасному намагніченні УР2 коефіцієнт трансформації плавно зменшуватиметься, а вторинна напруга збільшуватиметься. Вона досягне максимального значення, коли УР1 повністю є розмагнічений, а УР2 намагнічений — регулювальна обмотка  $w_\alpha$  є виведена.

Таким чином, в процесі перемагнічування реакторів число витків первинної обмотки зміниться в межах від  $\omega_{\beta} + \omega_{\alpha}$  до  $\omega_{\beta}$ , а коефіцієнт трансформації  $k_T$  — плавно в межах від  $k_{\min}$  до  $k_{\max}$ , що забезпечує плавне безконтактне регулювання вторинної напруги.

Залежно від характеру зміни повних опорів керованих реакторів можна одержувати різні закони регулювання коефіцієнта трансформації трансформатора

$$k_{T\gamma} = \frac{1}{\varpi_2} \cdot (\varpi_{\beta} + \gamma \cdot \varpi_{\alpha}) \quad (1.1)$$

де  $\gamma$  — параметр, залежний від режимів підмагнічування реакторів:

$$\gamma = \frac{z_{p2}}{(z_{\alpha} + z_{p1} + z_{p2})} \quad (1.2)$$

В процесі регулювання в контурі силових обмоток реакторів і регульовальної обмотки є струм циркуляції, значення якого залежить від э. д. с. регульовальної обмотки  $E_{\alpha}$ , її опору  $z_{\alpha}$  і суми повних опорів реакторів  $z_{p1} + z_{p2}$ :

$$I_{\gamma} = \frac{E_{\alpha}}{(z_{\alpha} + z_{p1} + z_{p2})} \quad (1.3)$$

Струм циркуляції збільшує струм, що намагнічує, і знижує коефіцієнт потужності трансформатора. Тому необхідно прагнути того, щоб струм  $I_{\gamma}$  в процесі регулювання був мінімальним, ураховуючи, що повний опір керованих реакторів залежить від прийнятого закону регулювання коефіцієнта трансформації.

Трансформатор з керованими реакторами у відпаюваннях володіє змінним внутрішнім опором, який, приведений до числа витків вторинної обмотки, може бути визначений як:

$$z_T = \frac{1}{k_{T\gamma}^2} \cdot [z_{\beta} + (1 - \gamma) \cdot z_{p2}] + z_2 \quad (1.4)$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 16   |

де  $z_{\beta}$  — повний опір нерегульованої частини мережної обмотки;  $z_2$  — повний опір вторинної обмотки.

Цю особливість необхідно урахувати при розрахунку енергетичних показників і аварійних режимів трансформатора.

Застосовуючи схеми автоматики для управління процесом підмагнічування і зміни комплексних опорів, керованих реакторів, а отже, плавної зміни коефіцієнта трансформації, можна одержувати різні зовнішні характеристики випрямного агрегату в межах регульовальної зони (рис. 2.1.в), розташованої між верхньою 1 і нижньою 5 обмежувальними кривими. Крива 1 відповідає повному розмагнічуванню УР1 і повному намагніченню УР2, а крива 5 — намагніченому УР1 і розмагніченому УР2. Змінюючи характер підмагнічування реакторів, можна отримати стабілізовані характеристики 4 перетворювача або характеристика вигляду 2, 3, що виходить на стабілізовані.

Одна і та ж зовнішня характеристика може бути отримана при різних співвідношеннях значень струмів підмагнічування керованих реакторів. Співвідношення цих струмів повинне бути вибрано так, щоб забезпечити максимальний коефіцієнт потужності; (мінімум втрат) перетворюючого агрегату у всьому діапазоні зміни навантажень для будь-якої зовнішньої характеристики. З цією метою на існуючих випрямних агрегатах, де плавне безконтактне регулювання напруги здійснюється керованими реакторами, прийняте, що в режимі холостого ходу обидва дроселі практично не підмагнічуються; у міру збільшення тягового навантаження струм підмагнічування УР2 пропорційно зростає від 0 до 30-35 А, а УР1 встановлюється на рівні 3-5 А і змінюється трохи.

Оскільки індуктивний опір УР1 практично залишається постійним, початий випуск регулюючих пристроїв, що складаються з реакторів керованого УР2 і некерованого Р. При цьому знижуються габаритні розміри і вартість пристроїв. У ряді випадків керовані реактори можуть бути замінені стрічно-паралельно включеними тиристорами (рис. 2.1.б).

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Розглядається питання про перенесення пристроїв регулювання (керованих реакторів або тиристорів) на вторинну сторону перетворювального трансформатора.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 1.3 Вдосконалення існуючих систем електропостачання

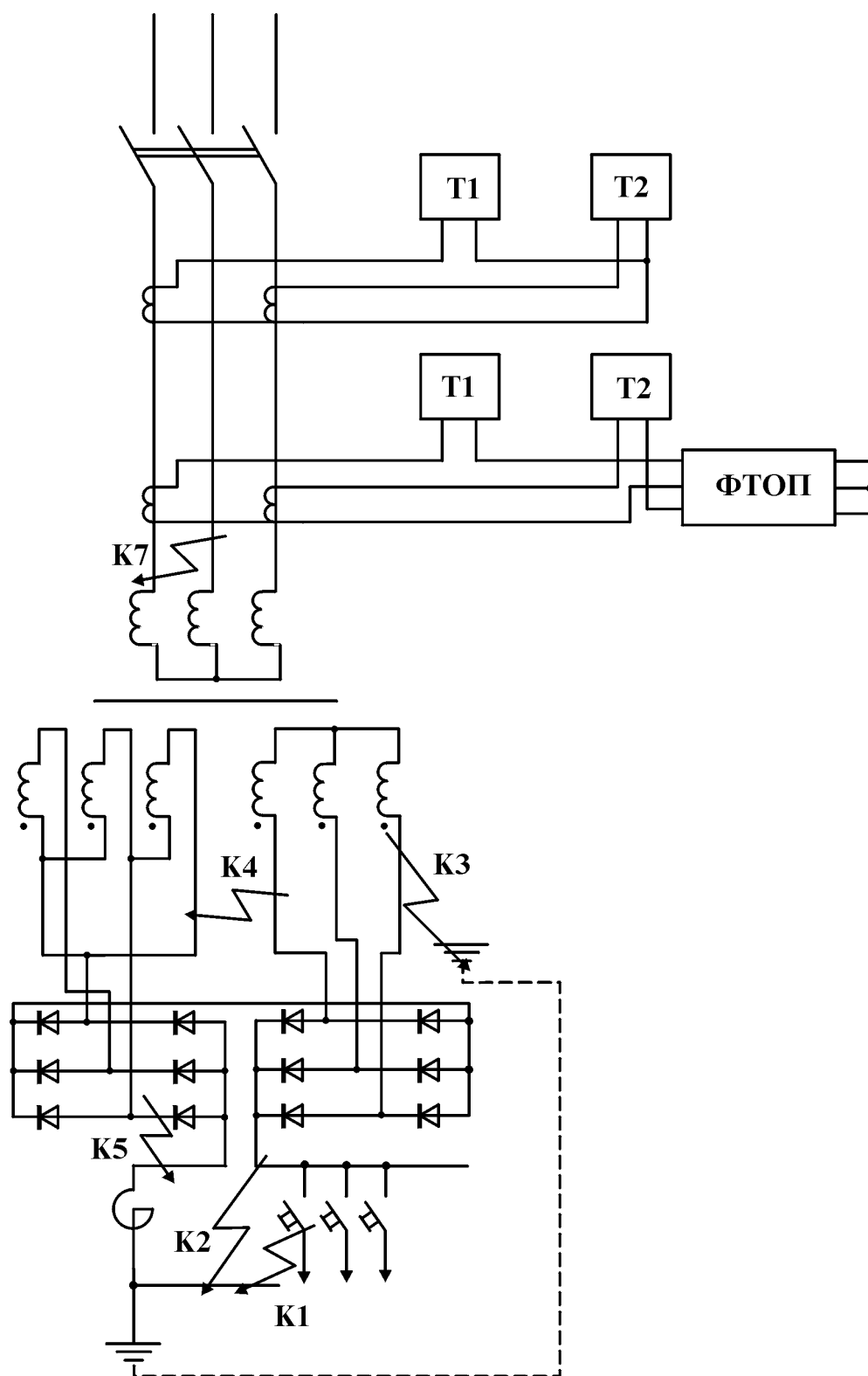


Рисунок 1.2 Місця можливих пошкоджень в перетворювальному агрегаті

Випрямна установка складається з тягового трансформатора і кремнієвого випрямляча. Первинна обмотка тягового трансформатора сполучена в зірку, вторинна обмотка має схему з'єднання «зірка – трикутник без зрівняльного реактора». До шин змінного струму установка підключена масляним вимикачем. До плюсової шини розподільного пристрою постійного струму установка підключена через катодний швидкодіючий вимикач. При спрацьовуванні релейного захисту установка відключається як з боку змінного, так і з боку постійного струму.

Випрямна установка обладнується наступними видами захистів (рис. 2.2): струмовим відсіченням і максимальним струмовим захистом — від к.з. на шинах постійного струму, від внутрішніх трифазних і двофазних замикань, а також від перевантажень; струмовим захистом зворотної послідовності — від двофазних к.з. і однофазних замикань на землю з боку вторинних обмоток тягового трансформатора; газовим захистом — від внутрішніх пошкоджень в трансформаторі; захистом, запобігаючим підживленню місця пошкодження постійним струмом (за допомогою швидкодіючого вимикача зворотного струму – БАОД). Крім того, здійснюється контроль стану вентилів випрямляча і справності системи охолодження, контроль температури трансформатора і випрямляча.

Струмове відсічення (реле РТ1 і РТ2) виконується без витримки часу. Вона захищає установку у разі к.з. на шинах випрямленого струму (точка к1), міжфазних замикань в вторинній обмотці (точки к3 і к4) і міжфазних коротких замикань в первинній обмотці тягового трансформатора (точка к6). Захист не повинен реагувати на кидки струму намагнічення. З цією метою струм спрацьовування вибирається по умові:

$$I_{сз} = (10-12)I_{т.ном} \quad I_{сз} \leq I_{к.min.}/K_{ч} \quad (1.5)$$

де  $I_{т.ном}$  — номінальний струм первинної обмотки трансформатора;  
 $I_{к.min}$  — мінімальний струм двофазного к.з. на введеннях первинної обмотки (точка к6).

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 20   |

Коефіцієнт чутливості  $K_{\text{ч}}$  приймається рівним 2.

Застосування реле з швидконасихуваними трансформаторами струму (реле РНТ), які менше реагують на аперіодичні складові кидків струму намагнічення, дозволяє понизити струми спрацьовування. В цьому випадку:

$$4I_{\text{т.ном}} < I_{\text{сз}} \leq (5-7.5)I_{\text{т.ном}} \quad I_{\text{сз}} \leq I_{\text{к.мін}} / K_{\text{ч}} \quad (1.6)$$

Кремнієві випрямлячі мають невелику масу і при перевантаженнях швидко нагріваються. Щоб уникнути неприпустимого перегріву час дії перевантаження повинен бути обмежений. В другому ступені максимального струмового захисту (реле РТЗ і РТ4) також зручно використовувати реле з швидконасихуваними трансформаторами струму. Витримка часу приймається 0,4-0,5 с. Струм спрацьовування вибирається по умові:

$$I_{\text{д.р.мах}} \frac{I_{\text{т.ном}}}{I_{\text{д.ном}}} K_{\text{з}} \leq I_{\text{сз}} \leq I_{\text{доп}} \frac{I_{\text{т.ном}}}{I_{\text{д.ном}}}, I_{\text{сз}} \leq \frac{I_{\text{к.мін}}}{K_{\text{ч}}} \quad (1.7)$$

де  $I_{\text{д.р.мах}}$  — максимальний випрямлений струм установки в робочому режимі;

$I_{\text{д.ном}}$  — номінальне значення випрямленого струму;

$I_{\text{доп}}$  — допустимий струм однохвилинного перевантаження випрямляча (4500 А);

$I_{\text{к.мін}}$  — мінімальний струм первинної обмотки при к.з. на виводах вторинної обмотки (точка к3).

Коефіцієнт запасу  $K_{\text{д}}$  приймається рівним 1,15—1,25, коефіцієнт чутливості  $K_{\text{ч}} = 1,5$ .

Для випрямних установок з номінальним випрямленим струмом 3000 А струм спрацьовування максимального струмового захисту приймають 4500 А (в перерахунку до значення випрямленого струму).

Струмове відсічення і максимальний струмовий захист, встановлюваний з боку первинної обмотки тягового трансформатора, не реагує на однофазні замикання на землю в вторинних обмотках трансформатора (точка к2).

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Для цього виду пошкоджень застосовують струмовий захист зворотної послідовності, яка виконується за допомогою реле РТ5 з фільтром струму зворотної послідовності ФТОП [7, 8, 9]. Вона реагує на всі види несиметричних замикань однієї фази на землю (точка к2) і на замикання між будь-якими двома фазами вторинної обмотки тягового трансформатора (точка к3). Первинний струм тягового трансформатора випрямної установки несинусоїдальний, тому для зниження струмів небалансу і підвищення чутливості захисту необхідне ФТОП включати через фільтр нижніх частот або резонансний фільтр, налаштований на частоту 50 Гц, який перешкоджає проходженню вищих гармонік у ФТОП.

Як показав досвід експлуатації, використання в розглядається захисту промисловістю реле струму зворотної послідовності, що випускаються, наприклад РТФ-7/2, не забезпечує тих, що вимагаються умов чутливості і відстройку від помилкових спрацьовувань.

Пошкодження усередині випрямної установки (точка к5) з боку змінного струму відключається розглянутими захистами, а з боку постійного струму — вимикачем В2, який запобігає підживленню місця пошкодження від паралельно включених агрегатів і сусідніх підстанцій.

Останніми роками перетворювальні агрегати забезпечують додатково тепловим захистом АТЗП. Він виконується за допомогою терморезистора, що поміщається в отвір в корпусі вентиля, і спрацьовує, якщо температура вентиля досягає гранично допустимого значення.

У випрямно-інверторних перетворювачах застосовують, в основному, ті ж захисти.

Їх уставки визначаються, як правило, інверторним режимом, оскільки для нього значення тривале допустимого струму менше.

При коротких замиканнях і перевантаженнях струм через агрегат може перевищити допустиме значення і привести до порушення його нормальної роботи.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Найбільш чутливий до струмових перевантажень силові напівпровідникові вентилі. Їх здатність навантаження визначається допустимою температурою нагріву напівпровідникової структури. Перевищення нормованих температур може привести до порушення нормальної роботи вентилів, скороченню терміну служби, а іноді і до пошкодження їх.

Для забезпечення збереження вентилів агрегати забезпечують захистами, відключаючими їх від сіті або перериваючими струм аварійного режиму до того, як температура структури досягне максимальній допустимій. Найпростіший і поширеній є максимальний струмовий захист з незалежною витримкою часу. Захист виконують одно- або двухступеневим і встановлюють на стороні мережних обмоток перетворювального трансформатора. При цьому він захищає як перетворювальні секції, так і трансформатор, тобто весь агрегат.

При двухступеновому виконанні захист від струмів к. з. на вторинній стороні трансформатора і перевантажень забезпечується ступенем з витримкою часу 0,4—0,5 с, необхідній для відбудови від кидків струму, що намагнічує, при включенні трансформатора. Струм спрацьовування цього ступеня захисту повинен бути не більше граничного струму агрегату  $I_{d.п.}$ . Для агрегатів більшості типів як граничний можна практично приймати струм двохвилинного перевантаження.

Струм спрацьовування ступеня з витримкою часу на первинній стороні перетворювального трансформатора може бути приблизно (без урахування впливу кута комутації) визначений шляхом перерахунку струму  $I_{d.п.}$  пропорційно відношенню номінальних значень первинного  $I_{L.1}$  і постійного  $I_{DIT}$  струмів цього трансформатора

$$I_{C.з.в.} \leq I_{DП} \frac{I_{L1}}{I_{DIT}}. \quad (1.8)$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 23   |

Вибраний струм спрацьовування повинен бути перевірений по чутливості до мінімального струму к. з. на вторинній стороні перетворювального трансформатора. Розрахунок виконують для випадку к. з. на шинах постійного струму (точка K2, рис.4.1) в мінімальному режимі при цьому

$$I_{C.з.в.} \leq I_{LK-2MIN} / K_{\text{ч}} \quad (1.9)$$

Коефіцієнт повернення реле захисту при розрахунку не ураховують, оскільки прийнятий спосіб визначення струму спрацьовування не допускає його перевищення. Струм  $I_{LK-2MIN}$  може бути знайдений шляхом перерахунку пропорційно відношенню струму к. з. на шинах постійного струму. Струми к. з. на контактній мережі (точка K1, рис.3.1), у тому числі віддалених, не враховують, оскільки вони повинні відключатися фідерними швидкодійними вимикачами.

Для відключення струмів к. з. в мережних обмотках трансформатора використовують інший ступінь захисту (відсічення), працюючий без витримки часу. По умові відбудови від кидків струму, що намагнічує, при включенні трансформатора первинний струм спрацьовування цього ступеня:

$$I_{с.з.о} > (4-5) I_{L.1}. \quad (1.10)$$

Якщо перетворювальна секція підключена до двох паралельно сполучених трансформаторів, струм  $I_{L.1}$  слід приймати рівним сумарному струму обох трансформаторів.

Прийнятий струм спрацьовування перевіряють по чутливості до струму двофазного к. з. на первинній стороні трансформатора (в точці K7) по умові (2.2.5). Коефіцієнт чутливості для відсічення приймають рівним 2.

Оскільки струми, дещо менші  $I_{с.з.о}$ , хоча і близькі до нього, не викликатимуть спрацьовування відсічення, вони можуть впливати на перетворювальний агрегат протягом часу роботи попереднього ступеня з

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 24   |

урахуванням власного часу роботи відключаючих апаратів і всіх реле схеми .  
Тому необхідно також переконатися в том, що

$$I_{с.з.о} < I_{L.T / ЗАЩ} \quad (1.11)$$

На тягових підстанціях, виконаних за типовими проектами, застосований одноступінчатий максимальний захист по двофазній двохранейній схемі із струмовим реле РНТ-565. Такий захист може не мати витримки часу; уставка її повинна відповідати умовам . Захист забезпечує селективне відключення пошкоджень як на первинній, так і на вторинній стороні трансформатора, і, отже, необхідність в другому ступені відпадає. На додаток до захисту звичайно встановлюють сигналізацію про перевантаження по струму (в однофазному виконанні).

Захист випрямно-інверторних агрегатів будується за тим же принципом, що і випрямних. Уставку її вибирають по інверторному режиму, для якого значення тривалого допустимого струму звичайно менше. Відмітна особливість вихідних ланцюгів захисту — наявність блокувань, забезпечуючих у всіх випадках відключення агрегату спочатку з боку постійного струму і лише після цього з боку змінного.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## 2 АНАЛІЗ НЕСПРАВНОСТЕЙ І ПОШКОДЖЕНЬ ТЯГОВИХ АГРЕГАТИВ

Аналіз статистики показав, що більшість відмов перетворювальних агрегатів пов'язана з вентилями (без урахування випадків «помилкової» роботи захисту від пробою до шістдесяти відсотків). Працездатність вентиля залежить від умов його роботи. Зв'язок між різними показниками, характеризуючи умови роботи і його працездатністю носить, частіше за все, кореляційний характер, тобто виявляючись лише в масі спостережень, не завжди виявляється в окремому випадку. Це пояснюється тим, що на вибраний показник працездатності, окрім основної причини, вплив якої досліджується, діють і багато які інші. Тому дуже важливо виділити критерій, що найбільш просто і достатньо повно відображає особливості роботи вентилів в умовах тягової підстанції. Основний показник надійності - напрацювання на відмову. Точно визначити напрацювання на відмову по фактичному часу роботи агрегату важко, особливо за наявності автоматичного включення резерву. Напрацювання на відмову за часом ніяк не ураховує різний ступінь завантаження перетворювального агрегату. Одним з основних показників роботи перетворювальних агрегатів є кількість переробленої ними електроенергії, яка ураховується на всіх підстанціях. Цей показник досить повно характеризує струмове і, отже, теплове навантаження конкретного агрегату, за винятком її циклічності. Тому доцільно оцінювати напрацювання на відмову по електроенергії, що переробляється агрегатом. Такий підхід перспективний також для агрегатів тягових підстанцій, повністю автоматизованих, без чергового персоналу. Період прироблення вентилів змінюватиметься в межах від 0 до 60 млн. кВт\*г. Напрацювання перетворювального агрегату змінюється унаслідок залежності інтенсивності відмов вентилів від співвідношення прикладеної напруги  $u_i$  і рекомендованої  $U_p$ .

|      |        |      |       |        |      |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  | 26   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |      |

Хай в процесі експлуатації з частотою  $\omega_i$  виникають перенапруження, що мають амплітуду  $u_i$  і тривалість  $\tau_i$ . За відсутності перенапружень інтенсивність відмов вентиля  $\lambda(t) = \lambda_n = \text{const}$ , у разі виникнення перенапруження інтенсивність відмов вентиля стрибкоподібно збільшується до  $\lambda(t) = \lambda_i = f \lambda(u_i / U_p)$  і після закінчення часу  $\tau_i$  знов приймає первинне значення  $U_n$ . Інтенсивність відмов вентиля (t) можна замінити деякою еквівалентною постійною інтенсивністю відмов:

$$\lambda_{\text{е}} = \frac{1}{t} \int \lambda(t) dt \quad (2.1)$$

В експлуатаційних умовах найбільш важливі характеристики надійності за достатньо тривалий період часу, для якого кількість перенапружень мало відрізняється від їх математичного очікування  $w_{it}$ , і заміна реальної інтенсивності відмов вентилів деяким еквівалентом цілком правомірна. Тривалість перенапружень у багато разів менше часу роботи, і для дискретних значень  $u_i$  отримаємо:

$$\Lambda_{\text{е}}(t) = \lambda_1 (t - \sum \omega_i t \tau_i) + \sum \omega_i t \tau_i \lambda_i \quad (2.2)$$

$$\Lambda_{\text{е}} \approx \lambda_1 + \sum \omega_i \tau_i \lambda_i \quad (2.3)$$

Перенапруження помітно впливають на напрацювання перетворювального агрегату, знижуючи його в окремих випадках на декілька десятків відсотків. При одному і тому ж напрацюванні для агрегату з великим числом послідовно з'єднаних вентилів допускається більша кількість вентилів, що відмовили. Чим менше це число, тим більше напрацювання агрегату до моменту досягнення заданого допустимого числа вентилів, що відмовили.

Тривалі спостереження за інтенсивністю виходу з ладу вентилів з моменту введення перетворювача в експлуатацію і до напрацювання 30-36 тис. г. ( 60-100 млн.кВт\*г ) показали, що в перебігу перших одного-двох років експлуатації спостерігається різке зниження відмов вентилів (приробочний період), після

|      |        |      |       |        |      |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  | 27   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |      |

чого інтенсивність їх відмов поступово стабілізується і можна вважати, що через три-чотири роки настає сталий період.

В таблиці 2.1 приведені деякі дані по відмовах елементів напівпровідникових агрегатів різних типів, отримані на підставі аналізу досвіду експлуатації.

Таблиця 2.1

| Найменування пошкодженого елемента або параметра | Значення показників надійності елементів випрямлячів |                           |           |                           |               |                           |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------|---------------------------|
|                                                  | УВКЕ-1                                               |                           | ПВЕ-3     |                           | ПВКЕ-2 (БКВЕ) |                           |
|                                                  | q                                                    | $\lambda, 10^{-6}$<br>1/ч | q         | $\lambda, 10^{-6}$<br>1/ч | q             | $\lambda, 10^{-6}$<br>1/ч |
| 1                                                | 2                                                    | 3                         | 4         | 5                         | 6             | 7                         |
| Вентилі:                                         |                                                      |                           |           |                           |               |                           |
| Загальний показник                               | 0,000721                                             | 0,136                     | 0,000379  | 0,1024                    | 0,000492      | 0,128                     |
| пробій                                           | 0,000211                                             | 0,0397                    | 0,000195  | 0,0526                    | 0,00031       | 0,0808                    |
| обрив                                            | 0,0000733                                            | 0,0149                    | 0,0000171 | 0,0046                    | —             | —                         |
| Пониження зворотного опору                       | 0,000263                                             | 0,049                     | 0,000144  | 0,0387                    | 0,00007       | 0,0202                    |
| Контури Rв і Св                                  | 0,000243                                             | 0,0458                    | —         | —                         | —             | —                         |
| Шафа RC                                          | 0,049                                                | 9,2                       | 0,0306    | 8,4                       | —             | —                         |
| Розрядники                                       | 0,00108                                              | 0,2036                    | 0,0138    | 3,801                     | —             | —                         |
| Система охолодження                              | 0,035                                                | 6,598                     | 0,0170    | 4,686                     | —             | —                         |

Примітка:

- 1) q – вірогідність відмови;
- 2) Приведена інтенсивність відмов  $\lambda$  для вентилів і контурів Rв і Св і параметр потоку відмов  $\lambda$  для шаф RC, розрядників і системи охолодження.

|      |        |      |       |        |      |  |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  |  | 28   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |  |      |

Статистичні дані, що відображають досвід експлуатації перетворювального агрегату ВІП-12 знаходяться на стадії накопичення і обробки і через об'єктивні причини не можуть бути вказаний в даному проекті.

Причини пошкодження вентилів різні: розгерметизація, пробої, руйнування паяних з'єднань усередині вентиля і т.д.

Механізми відмови вентилів можуть бути наступними:

1. Розтріскування (або розшарування) кремнієвої пластини. Тріщини починаються, як правило, поблизу периферії вольфрамового термокомпенсуючого диска малого діаметра. Ці пошкодження викликані появою механічних напруг в кремнієвій пластині унаслідок різниці температур кремнієвої пластини і термокомпенсуючих дисків під час перевантаження.

2. Пошкодження вентиля під дією повторно прикладеної прямої напруги. Якщо температура структури, після проходження імпульсу струму перевантаження, до моменту подання прямої напруги перевищуватиме максимальну робочу температуру, то можлива втрата структурою запираючих властивостей в прямому напрямі або стійкості до швидкості наростання прямої напруги. Криві температурній залежності напруги перемикавання, по яких можна оцінити граничну температуру структури у момент приложення до вентиля прямої напруги є для кожного типу вентилів.

3. Розплавлення припою. У вентилях, які працюють в схемах з невеликою робочою напругою, струм перевантаження може виявитися достатнім для часткового розплавлення припою в сплаві кремній-вольфрам.

Основна ж частка пошкоджень доводиться на пробої вентилів 90 %. Причому, якщо в приробочний період більшість відмов вентилів викликала їх пробоями, то в подальшому зросла частка обривів. Обриви часто фіксуються на випрямлячах, у яких було замінено багато вентилів унаслідок пробою. Звідси можна зробити висновок, що причиною значної частини відмов вентилів є їх перегрів через так зване " теплого старіння", яке в умовах тягової підстанції

|      |        |      |       |        |      |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  | 29   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |      |

починає прогресувати після п'яти-шести років експлуатації перетворювального агрегату. Для зіставлення можна привести дані про пошкодження вентилів на зарубіжних залізницях. На японських дорогах основною причиною виходу з ладу вентилів в експлуатації служило зростання зворотного струму у 70 % вентилів, що відмовили. На підстанціях залізниць Франції вірогідність виходу з ладу вентилів складає 0,003. На підстанціях нідерландських залізниць відзначено збільшення зворотного струму у 10 % вентилів після 4 років роботи.

Механізм теплового старіння силових діодів штирьової контрукції з паяними контактами полягає, як вже наголошувалося вище, в поступовому руйнуванні і окислення спаю між термокомпенсуючим вольфрамовим диском і мідною підставою корпусу вентиля при багатократних термомеханічних діях металів з різними коефіцієнтами лінійного розширення на шар припою між ними. Швидкість такого старіння залежить від великого числа різноманітних, часто випадкових чинників, але у всіх випадках вона тим вище, чим більше частота і глибина термоцикування, пов'язана з нерівномірністю навантаження.

Ознакою розвитку процесу старіння вентиля є збільшення його внутрішнього теплового опору  $R_v$ , яке характеризує теплопровідність внутрішніх елементів конструкції і визначає температуру перегріву р-п-структури ( $\Theta_{pn}$ ), щодо корпусу ( $\Theta_k$ ) на 1Вт розсіюваній у вентилі потужності.

Внутрішній тепловий опір вентиля виражається формулою

$$R_v = (\Theta_{pn} - \Theta_k) / \Delta P, \text{ C}^0 \quad (2.4)$$

Де  $P$  - розсіювана потужність.

Зростання  $R_v$  знижує довговічність вентилів не тільки за рахунок пробоїв р-п-переходу в результаті можливого перевищення допустимих значень  $U_{pn}$ , але і за рахунок обривів внутрішнього ланцюга діодів, пов'язаних з руйнуванням паяних контактів. Навіть за наявності опорів зв'язку між паралельним гілками вентилів, гілка послідовно з'єднаних вентилів, в якій відбувся обрив, практично

|      |        |      |       |        |      |  |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  |  | 30   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |  |      |

повністю руйнується від струму, що приводить до перевантаження гілок, що залишилися в роботі, їх додаткового перегріву, прискореного старіння, обриву ще однієї гілки і т.д.

Розрахунки показують, що при обриві однієї гілки швидкість старіння вентилів, що залишилися в роботі, може збільшуватися в 1.5-3 рази, а при обриві двох гілок - до 12 разів.

На надійність перетворювального агрегату в умовах теплового старіння вентилів разом з пробоями і обривами впливає також поява частих відмов, що перемежаються, викликається «помилковими» спрацьовуваннями захисту від пробоем вентилів. Це пояснюється наступним:

Погіршення загального теплового стану перетворювального агрегату збільшує вірогідність попадання в один з паралельних рядів двох і більш вентилів, що перегріваються, з підвищеними значеннями  $R_v$ , в той час, як в суміжному ряді таких вентилів може не бути. В схемі захисту від пробоем вентилів порушується баланс моста, утвореного цими рядами вентилів і шунтуючими резисторами. При певному поєднанні числа вентилів, що перегріваються, значень їх внутрішніх теплових опорів і навантаження струм небаланса збільшується до значень, достатніх для спрацьовування захисту. У міру погіршення теплового стану вентилів знижується струм агрегату, при якому захист спрацьовує помилково. Стійкість роботи таких агрегатів забезпечується перемиканням захисту на сигнал з подальшим її відновленням після заміни або перерозподілу вентилів по рядах вентиляної фази. Все висловлене підтверджує, що тепловий опір вентиля є одним з основних параметрів, визначальних його працездатність. Тому цей параметр повинен нормуватися і контролюватися не тільки для нових вентилів, але і для експлуатованих. Аналіз експлуатації перетворювальних агрегатів приводить до висновку про необхідність спробувати збільшити довговічність експлуатованих вентилів. Для цього можливий три шляхи. Перший шлях полягає в максимально можливому вирівнюванні умов охолодження і швидкості старіння вентилів, для чого

|      |        |      |       |        |      |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  | 31   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |      |

вентилі верхніх і нижніх рядів після декількох років експлуатації міняють місцями. Другий шлях полягає в збільшенні ресурсу вентилів за рахунок нормування гранично допустимих в експлуатації значень теплового опору . Нормування здійснюють виходячи їх максимально допустимої температури р-п структури в робочих режимах при порівняно рідкісних і короткочасних перевантаженнях (не 140, а 160 градусів по Цельсію ). По попередніх розрахунках таке нормування дозволило б підняти значення бракувань внутрішнього теплового опору на 20-40 % і, відповідно, на декілька років збільшити термін служби вентилів. Третій шлях - це підвищення довговічності вентилів за рахунок полегшення режимів роботи (зниження навантажень) перетворювального агрегату. Полегшення режиму роботи агрегату приведе не тільки до можливості збільшення значення бракування  $R_B$ , але одночасно і до зниження швидкості його росту в процесі теплового старіння. Проте, у зв'язку з тим, що при виборі доцільних режимів роботи агрегатів потрібно зважати перш за все на втрати в них енергії, зниження завантаження перетворювального агрегату економічно лише до певної межі. Аналіз режимів роботи агрегатів і установок автоматичного включення і відключення резерву (АВОР), що використовується на ділянках електропостачання різних доріг, показав, що більшість з них встановлює режим роботи з урахуванням конкретних умов і фактичного завантаження підстанцій. Струмочасові уставки АВОР відрізняються великою різноманітністю. Так найбільші уставки по струму реалізують Південна і Донецька дороги, де струм включення резервного агрегату, як правило, складає 3250-4000 А. На Львівській і Придніпровській залізницях уставки по струму дещо нижче. Зіставлення даних про швидкості старіння вентилів на Придніпровській дорозі з прийнятими на її підстанціях уставками дозволяє зробити висновок, що на процеси старіння, окрім основних чинників (характеру і середнього рівня завантаження підстанцій), певний вплив надають і вибрані режими регулювання робочої потужності агрегатів. Тепловий стан вентилів перетворювачів цієї дороги, працюючих з порівняно невеликими

|      |        |      |       |        |      |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  | 32   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |      |

струмочасовими уставками (включення 2500-2800А, 3-6 мін і 3000 А, 15с) значно краще, ніж перетворювачів Львівської дороги, тоді як характер графіка і середній рівень навантаження на окремих підстанціях обох доріг практично співпадає.

Залежність терміну служби вентилів перетворювачів з примусовим повітряним охолодженням, отримані для найважчих умов експлуатації, від середньодобового струму підстанції показують, що з погляду старіння вентилів область доцільного переходу на паралельну роботу двох агрегатів знаходиться в діапазоні 1300-1500 А. Одиночна або почергова робота перетворювального агрегату без АВОР при великих струмах приводить до різкого зменшення терміну служби вентилів, що може помітно вплинути на економічно доцільні режими роботи агрегатів і установок АВОР.

Останніми роками досягнутий певні успіхи в створенні силових напівпровідникових приладів із спеціальними характеристиками і тимчасовими параметрами і ін. Ведуться роботи по значному збільшенню номінальних напруг приладів на основі використання дифузійної і епітаксимальної технологій. Підвищення номінальних струмів досягається завдяки застосуванню структур великих діаметрів і інтенсифікації охолодження.

Вітчизняна промисловість добилася значних успіхів в розробці і упровадженні у виробництво уніфікованих серій напівпровідникових некерованих вентилів на струми 320 і 500 А.

Переваги вентилів конструкції таблетки, такі, як можливість зміни нормованого струму унаслідок застосування одно- і двостороннього охолодження, підвищення циклостійкості, дозволяють сподіватися на те, що ці вентиля замінять в майбутньому більшість штирьових силових напівпровідникових приладів.

Застосування вентилів на великі струми і зворотні напруги дозволить створити перетворювальні агрегати підвищеної надійності.

|      |        |      |       |        |      |  |  |      |
|------|--------|------|-------|--------|------|--|--|------|
|      |        |      |       |        |      |  |  | Арк. |
|      |        |      |       |        |      |  |  | 33   |
| Змн. | Кільк. | Арк. | № док | Підпис | Дата |  |  |      |

### 3 МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ТЯГОВИХ АГРЕГАТІВ

#### 3.1 Перетворювальний агрегат

Вихід з ладу і відмови СН в умовах експлуатації впливають на надійність та режими роботи, як окремих пристроїв, так і залізничного транспорту в цілому. Проблему підвищення рівня безвідмовної роботи СН можна значною мірою вирішити за допомогою технічної діагностики як функціональної, так і тестової.

Функціональна (вбудована) діагностика використовується безпосередньо при експлуатації і застосовується практично на всіх типах СН. Однак даний вид діагностики, як правило, визначає вже відмовлені силові напівпровідникові прилади (СНП) або плечі перетворювача, де сталася відмова в процесі експлуатації. Дуже часто пристрої функціональної діагностики мають значну кількість допоміжних ланцюгів, які в свою чергу самі можуть бути можливими причинами відмов і тим самим вивести з ладу перетворювач. Безумовно, це не означає, що функціональна діагностика неефективна. Але для зниження відмов СНП безпосередньо в експлуатації необхідно оптимізувати співвідношення функціональної та тестової діагностики, а також періодичність технічного обслуговування СН.

При сучасному рівні розвитку вимірювальної і обчислювальної техніки тестова діагностика дозволяє виявляти не тільки відмови, але й потенційно-ненадійні СНП в перетворювачах. Отже, з'являється можливість прогнозувати подальший стан напівпровідникових приладів та перетворювачів в цілому.

Для цих цілей найбільш оптимально застосування експрес-діагностики. Розроблено ряд пристроїв експрес-діагностики СН різного типу, що застосовуються як на електрорухомому складі залізниць, так і на тягових підстанціях залізниць, метрополітену. Розроблені пристрої дозволяють

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

виявляти відмовлені і потенційно-ненадійні СНП таблеткової і штирьової конструкції по зворотньому струму і струму витoku приладів в закритому стані. Дані пристрої дозволяють запобігти можливі відмови при подальшій експлуатації СН.

Структурна схема одного з таких пристроїв наведено на рис. 3.1. Принцип роботи цього пристрою полягає в розрахунку за заданим алгоритмом зворотних струмів і струмів витoku СНП по виміряним значенням резисторів зв'язку і потенціалів точках з'єднання цих резисторів з гілками силової схеми. Застосування мікропроцесорної техніки дозволяє обробити великий обсяг інформації і визначити потенційно-ненадійні СНП в плечі перетворювача, а також підвищити точність вимірювання за рахунок застосування метрологічних способів зменшення похибки.

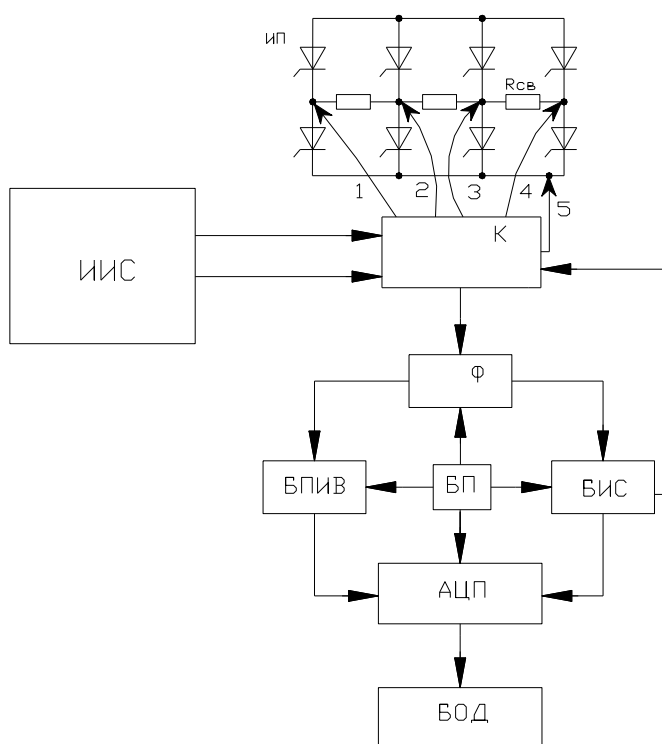


Рисунок. 3.1 Універсальний пристрій діагностики перетворювачів:

ИИС - джерело випробувальних сигналів; БК - блок комутації; Ф - фільтр; БП – блок живлення; БИН - блок вимірювання напруги; БИС- блок вимірювання опору; АЦП - аналого-цифровий

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

перетворювач; БОД - блок обробки даних.; 1, 2, 3, 4, 5 – висновки пристрою; Rс - резистори зв'язку, ИП- випробувальний прилад.

### 3.2 Алгоритм діагностування стану тягового трансформатора

В даний час відомий різні методи і апаратура, дозволяючі провести діагностику на місці експлуатації трансформаторів. Існуючі методики діагностики вимагають використання крупногабаритного устаткування і є енергоємними або неуніверсальні з погляду визначення різного роду дефектів. Часто контроль ізоляції трансформатора на місці експлуатації зводиться до вимірювання опору ізоляції за допомогою мегомметра, що не дозволяє знайти ряд дефектів, таких, як часткові пробої на корпус, які виявляються при напрузі більшій, ніж 2,5 кВ, межвиткові пробої.

У зв'язку з цим виникла необхідність в розробці нової методики діагностики, яка має малогабаритну переносну апаратну реалізацію і дозволяє проводити діагностику на місці експлуатації. Можливості даної методики повинні включати виявлення часткового пробою на корпус, межвиткових пробоїв, погіршення поперечної ізоляції.

При розробці методики діагностики урахувалася можливість її технічної реалізації. При побудові методики використовувалися конструктивні особливості трьохстержньових трансформаторів. Один з підходів для визначення реального стану трансформатора — це випробування, полягаюче в створенні зондуючої ударної дії і в отриманні відгуку від трансформатора.

В основу контролю стану були покладені імпульсні випробування з подальшою тривалою дією, тобто з підтримкою амплітуди напруги у високовольтній обмотці не нижче номінального для вимірювання струмів витоку на корпус при робочій напрузі.

Для випробувань використовуються одиночні імпульси, форма яких представлена на рис. 3.2.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 36   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

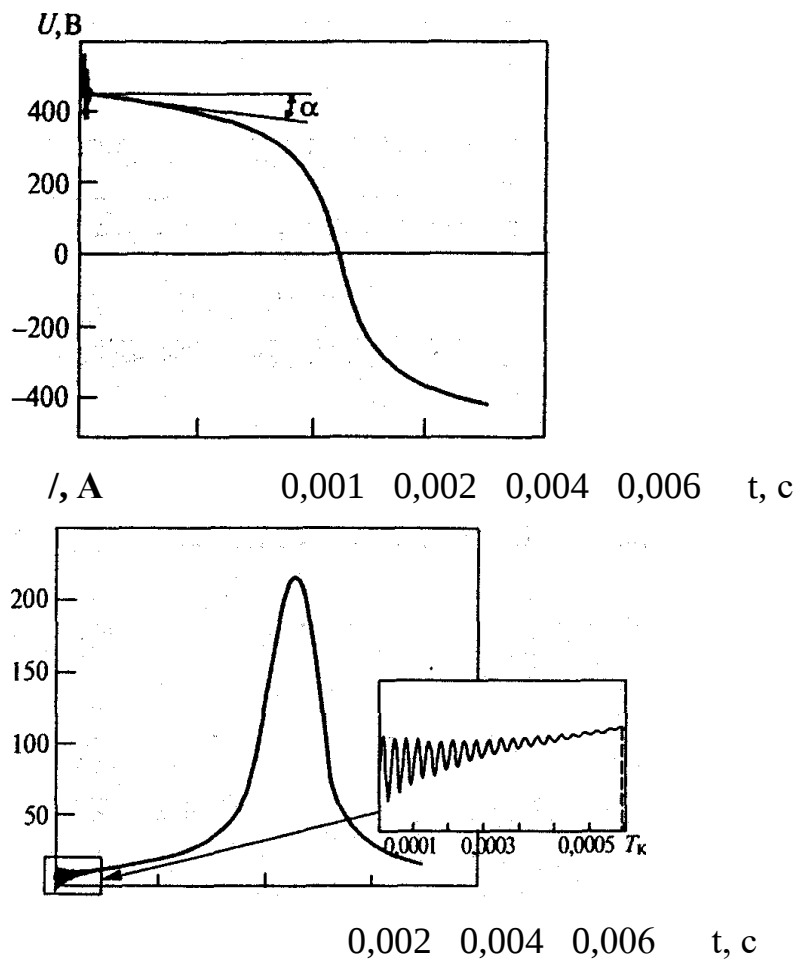


Рисунок 3.2 Форма одиночних імпульсів

Передбачається, що перед випробуваннями трансформатор відключається від сіті живлення і від випрямного агрегату. В процесі випробувань конденсатор генератора, заряджений до напруги від 150 до 900В, розряджається на низьковольтну обмотку трансформатора. Основні вимоги до параметрів імпульсу продиктовані необхідністю забезпечення:

- 1) стійкої передачі імпульсної напруги з обмотки низької напруги в обмотку вищої напруги;
- 2) значної амплітуди в обмотці вищої напруги (близькій до номінальної);
- 3) проходження високочастотних коливань на «полиці» імпульсу;
- 4) безпеки випробувань для трансформаторів.

Процес можна розділити на три етапи: передача імпульсу по фронту і високочастотні коливання (рис. 432), пов'язані з наявністю індуктивності

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 37   |

розсіяння і ємкостей конструкції; «полиця» імпульсу; нелінійна частина — намагнічення сердечника, падіння вхідної індуктивності і розряд конденсатора генератора. Для цілей діагностики використовується проміжок часу  $[0, T_k]$ , де  $T_k$ —тривалість високочастотних коливань. При випробуваннях використовувався імпульс тривалістю 4 мс, при цьому тривалість високочастотних коливань для різних типів трансформаторів 300-700 мкс. В якості «відгуку» на імпульсну дію, а також для визначення втрат використовується струм на «землю». Під струмом на «землю» розуміється струм, протікаючий через вимірювальний шунт, сполучаючий кінець високовольтної обмотки із заземленим сердечником трансформатора. Схема експерименту представлена на рис. 3.3.

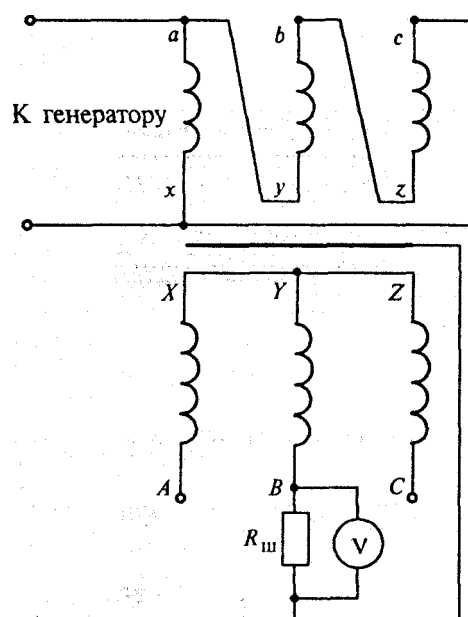


Рисунок 3.3 Схема експерименту

В даному випадку імпульс подається на обмотку НН фази. Обмотка, що тестується, — обмотка ВН фази В. Для вимірювання струму на «землю» знімається напруга з вимірювального опору — шунта  $R_{ш}$ .

Інтегральне значення струму на «землю» умовно містить три складових: постійну складову, пов'язану із струмами витоку; складову, пов'язану з активними втратами в обмотках; складову, пов'язану з втратами в діелектриці ізоляції і магнітопроводі при високочастотних коливаннях.

Наявність межвиткового замикання в обмотці ВН фази В приводить до різкого зменшення магнітної індукції в стержні В через частковий перерозподіл магнітного потоку на стержень С, до зниження амплітуди напруги і, як наслідок, до зменшення втрат в сталі магнітопровода, в діелектриці ізоляції, а також до зменшення постійної складової струму на «землю». Крім того, короткозамкнутий виток приводить до зміни частотних характеристик обмотки, що виявляється в стисненні кривої струму.

Така зміна форми кривої підтверджується моделюванням імпульсних процесів з використанням схем заміщення з розподіленими параметрами. Стиснення кривої також знижує інтегральне значення струму.

Наявність пробоя на корпус, навпаки, приводить до різкого збільшення постійної складової струму на «землю».

Проведений теоретичний аналіз дозволяє ввести критерій (системну функцію), який характеризує ізоляцію як систему, яка може знаходитися в різних станах: справному, з частковим (починаючи з деякої напруги) пробоем на корпус, з міжвитковими пробоями:

$$R_p^Q = \frac{U_{TP}}{\int_0^{T_k} i_Q(t) dt}$$

де як змінна виступає амплітуда, що подається на обмотку НН фази р імпульсної напруги;  $U_{TP}$  – амплітуда напруги в обмотці НН фази р; Q – фаза, з обмотки ВН якої заміряється струм на землю  $i(Q)$ ;  $T_k$  – тривалість коливань.

При міжвитковому пробое  $R_p(Q)$  зростає, при пробое на корпус, починаючи з деякого рівня напруги — убуває, спрямовуючись до нуля при подальшому підвищенні напруги. Використовуючи повний набір системних функцій можна будувати різні алгоритми діагностики стану ізоляції.

Так, з припущення наявності не більше одного дефекту в ізоляції і за відсутності тестових таблиць, достатнім і мінімальним набором є:  $R_b(A)$ ,  $R_b(C)$ ,  $R_a(B)$ . Алгоритм у вигляді схеми представлений на рис. 3.4.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 39   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

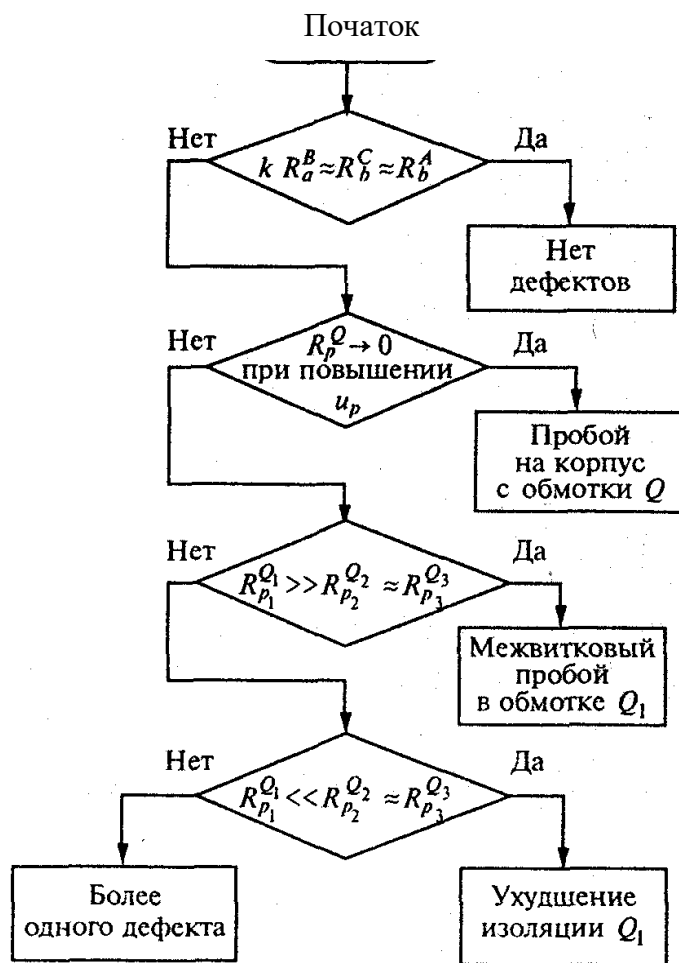


Рисунок 3.4 Алгоритм діагностування стану тягового трансформатора

З теоретичного розгляду відношення  $\kappa$  « означають більше в 1,5 разу, менше в 1,5 разу відповідно,  $1\kappa = 1,33$  — коефіцієнт приведення, ураховуючий не однаковий розподіл магнітного потоку при подачі імпульсу на низьковольтну обмотку середнього і крайнього стержня.

Для інженерної реалізації запропонованої методики було розроблено і виготовлено пристрій діагностики ізоляції трансформаторів (ПДІТ). Пристрій складається з генератора одиночних імпульсів струму і вимірювального блоку. Випробування проводяться на різних ступенях, відповідних різному рівню напруги від 150 до 900В до якого заряджений конденсатор генератора. Значення системної функції для кожного значення напруги висвічується на індикаторі.

При зростанні напруги системна функція має монотонно-убуваючий характер, що пов'язано із зростанням втрат в діелектрикоізоляції і магнітопроводі не пропорційно прикладеній напрузі.

Стрибкоподібна поведінка системної функції з падінням в нуль свідчить про наявність часткового пробою на корпус, який може не виявлятися при низькому значенні напруги, що подається. Таким чином, відстежування характеру поведінки системної функції дає додаткову інформацію про стан ізоляції.

Маса виготовленого пристрою 14 кг, розміри 650x450x250 мм. На лицьову панель винесені засоби вимірювання, індикації, фіксації і управління. Пристрій реалізований з урахуванням експлуатаційних вимог, забезпечуючих його основні технічні характеристики: надійність, простоту в обслуговуванні, мінімально можливі габарити і масу.

За допомогою розробленого пристрою були проведені експериментальні дослідження на різних трансформаторах. Спочатку імпульс подається на низьковольтну обмотку середнього стержня, по черзі тестуються високовольтні обмотки крайніх стержнів, для кожного ступеня (рівня напруги) записується значення системної функції.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Далі імпульс подається на низьковольтну обмотку крайнього стержня, тестується високовольтна обмотка середнього стержня.

В табл. 3.1 приведені дані для трансформатора ТСЗП-2500/10.

**Таблиця 3.1- Значення системної функції трансформатора ТСЗП-2500**

| Ступінь                                                   | Rb(A) |        | Rb(C) |      | Ra(B) |      |
|-----------------------------------------------------------|-------|--------|-------|------|-------|------|
|                                                           | Б.д.* | Пр.**А | Б.д   | Пр.С | Б.д   | Пр.В |
| 1                                                         | 12,1  | 25,1   | 9,2   | 25,1 | 9,2   | 25,1 |
| 2                                                         | 10,2  | 24,3   | 8,1   | 17,2 | 7,3   | 19,1 |
| 3                                                         | 9,1   | 21,2   | 7,1   | 15,1 | 6,3   | 16,3 |
| 4                                                         | 7,0   | 17,3   | 6,2   | 13,1 | 5,1   | 14,3 |
| 5                                                         | 7,0   | 15,3   | 5,2   | 11,1 | 4,1   | 12,2 |
| 6                                                         | 6,3   | 14,3   | 5,1   | 10,0 | 4,0   | 11,1 |
| * Б.д. — обмотка без дефектів; ** Пр. — пробій в ізоляції |       |        |       |      |       |      |

З табл. 3.1 видно, що при межвитковом пробіі значення системної функції збільшується більш, ніж в 1,5 разу в порівнянні з нормальним станом.

В табл. 3.2 приведені дані для іншого трансформатора ТСЗП-2500/10, в якого є частковий пробій на корпус. Це добре видно по значеннях Rb(C): стрибкоподібна поведінка, різке падіння значень (більш ніж в 1,5 разу в порівнянні з нормальним станом) при збільшенні напруги, що подається.

**Таблиця 3.2- Значення системної функції трансформатора ТСЗП-2500/10  
(пробій на корпус з боку катушки стержня С)**

| Ступінь | Rb(A) |      | Rb(C) |       | Ra(B) |      |
|---------|-------|------|-------|-------|-------|------|
|         | Б.д.  | Пр.А | Б.д.  | Пр. 3 | Б.д.  | Пр.В |
| 1       | 12,0  | 25,1 | 9,2   | 7,1   | 9,2   | 25,1 |
| 2       | 9,1   | 24,3 | 8,3   | 6,3   | 7,4   | 19,2 |
| 3       | 8,1   | 16,3 | 7,1   | 0,1   | 6,3   | 16,2 |
| 4       | 7,1   | 15,1 | 6,3   | 3,4   | 5,3   | 14,4 |
| 5       | 7,0   | 13,1 | 5,2   | 0     | 4,3   | 13,0 |
| 6       | 6,3   | 12,1 | 5,0   | 0     | 4,0   | 11,1 |

Наявність знайдених дефектів підтверджувалася стандартною програмою випробувань на стаціонарному стенді.

З допомогою ПДІТ можна знайти погіршення ізоляції в поперечному напрямі: збільшення втрат, що виявляється в зменшенні значень системної функції.

На рис. 3.5 представлений графік значень системної функції для обмотки однієї і тієї ж фази, відповідні різному стану ізоляції: крива 7 — межвитковое замикання, крива 2 — нормальний стан, крива 3 — збільшення втрат в поперечній ізоляції (ізоляція між обмоткою і сердечником), крива 4 — пробій на корпус. Крива 3 представляє випадок початку погіршення ізоляції, реєстрація погіршення ізоляції проводиться, коли значення залежності 3 менше відповідні значення залежності 2 в 1,5 разу.

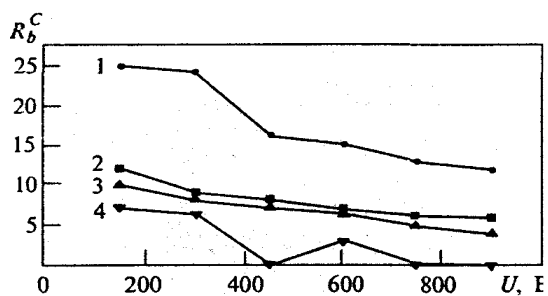


Рисунок 3.5- Графік значень системної функції обмотки з різним станом ізоляції

Дана методика, що має малогабаритну переносну апаратну реалізацію, підходить для всіх типів 3х стержньових силових трансформаторів, а введення системної функції дає можливість уникнути візуальних спостережень за зміною форм кривих, а також складної математичної обробки сигналів.

### 3.3 Випробування індукованою напругою

При випробуванні ізоляції прикладеною напругою залишається невипробуваній так звана «подовжня ізоляція обмотки», тобто ізоляція обмотки між витками, шарами, окремими секціями і фазами. Випробувальну напругу між витками можна отримати тільки індукованою напругою. Ця ізоляція залежно від конструкції обмотки, розташування витків і величини напруги на виток піддається дії напругою різної величини.

Припустимо, що до обмотки підведено напругу на кожний виток 10 В. Напруга між двома сусідніми витками в обох обмотках буде рівна напрузі двох витків, тобто 20 В. Напруга між витками різних шарів в шаровій обмотці 5 і 6, 4 і 7, 3 і 8, 2 і 9, 1 і 10 буде рівна 20, 40, 60, 80 і 100 В.

Такий же розподіл напруги буде і між витками інших шарів. Отже, найбільша напруга між шарами в обмотці рівно 100 В.

В безперервній обмотці найбільша напруга буде в каналі між секціями, причому так само, як і в першому випадку, воно неоднакове у всіх крапках. Так, між витками 7 і 8, 6 і 9, 5 і 10, 4 і 11, 3 і 12, 2 і 13, 1 і 14 напруга буде рівна 20, 40, 60, 80, 100, 120 і 140 В.

Число витків, шарів і напруга на виток в даному випадку прийняті довільно тільки для того, щоб принципово розглянути розподіл напруг.

Насправді ж напруга між шарами і секціями буває значно більша і може досягати декількох кіловольтів. Як правило, величина випробувальної напруги не повинна перевершувати подвійного номінальної через небезпеку перекриття між фазами.

При цьому випробуванні до однієї з обмоток підводять подвійну номінальну напругу цієї обмотки, а друга обмотка залишається розімкненою. Обидві обмотки в цьому випадку знаходяться під напругою, пропорційною числу їх витків. Звичайно зручніше підводити напругу до обмотки НН.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Проводити випробування подвійною індукованою напругою при частоті 50 Гц практично неможливо.

Збудити трансформатор до подвійної номінальної напруги при частоті 50 Гц практично неможливо, оскільки струм холостого ходу через велику індукцію в магнітопроводі перевищуватиме у багато разів номінальний струм трансформатора, що може привести до його пошкодження.

Тому треба мати нагоду збудити трансформатор до подвійної напруги без скільки-небудь значного збільшення індукції.

Відомо, що

$$E = K \cdot f \cdot B$$

де  $E$ —діюче значення е. д. с.;  $K$ —коефіцієнт пропорційності, рівний добутку числа витків обмотки, перетину сердечника ( $\text{см}^2$ ) і числа 4,44;  $f$ —частота;  $B$ —індукція.

Оскільки

$$B = \frac{E}{K \cdot f} \quad (3.3)$$

то для того, щоб зберегти індукцію при подвійній напрузі трансформатора, необхідно збільшити частоту в 2 рази.

Зважаючи на це випробування індукованою напругою проводяться при частоті, підвищеній не менше ніж в 2 раз, тобто не менше 100 Гц протягом 1 мін. Випробування може проводитися при частоті, перевищуючій 100 Гц, тривалість випробування зменшується в цьому випадку обернено пропорційно до частоти

$$\frac{100}{f'} = \frac{t}{60}; \quad t = \frac{60}{f'} \cdot 100$$

де  $f'$ —частота (більше 100 Гц), при якій проводилося випробування;  $t$ —тривалість випробування, с.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Таким чином, тривалість випробування при частоті

100 Гц..... 60 с

150 Гц..... 40 с

200 Гц..... 30 с

250 Гц..... 24 с

При збільшенні частоти до 400 Гц тривалість випробування не повинна бути менше 20 с. Випробування при частоті вище 400 Гц не проводиться у зв'язку з різким збільшенням втрат в сталі магнітопровода.

Через можливість пробою ізоляції неприпустимо в процесі збірки випробовувати подвійною індукованою напругою активну частину трансформатора, який повинен бути заповнений маслом після збірки. Вітковую і міжсекційну ізоляцію до запаювання схеми випробовують номінальною або підвищеною на 20-30 % напругою при частоті 50 Гц. При цьому обмотка ВН повинна бути розділена на частини щоб уникнути виникнення на кінцях обмотки дуже високої напруги і можливих перекриттів і пошкоджень ізоляції. Кінці роз'єднаних катушок повинні бути достатньо віддалені один від одного, щоб між ними не виникло перекриття.

Якщо трансформатор на номінальну напругу 35 кВ виготовлений з циліндровими обмотками, то випробовувати його без масла можна напругою не більше 40 % від номінальної.

Принципова схема випробування індукованою напругою приведена на рис. 4.6

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

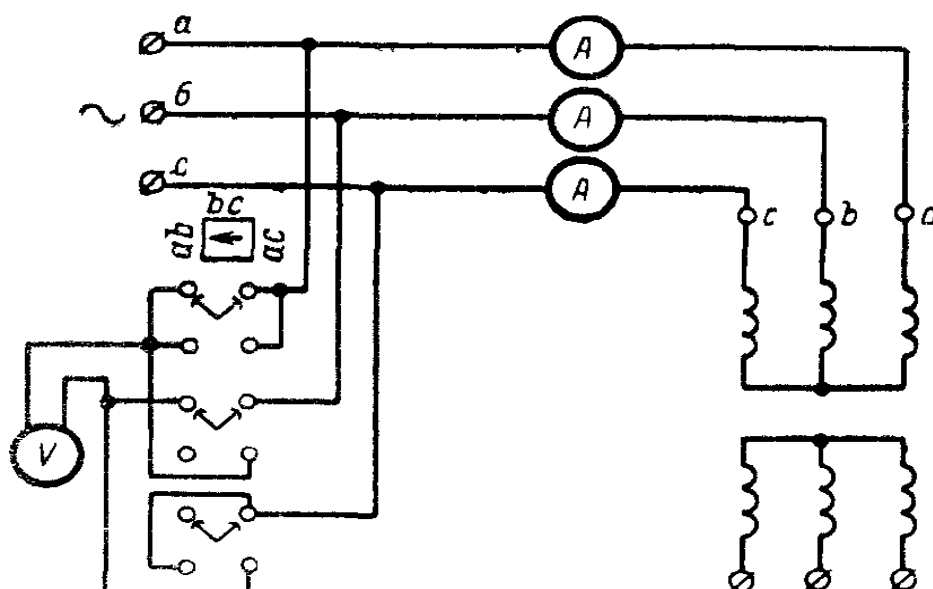


Рисунок 3.6 Схема випробування індукованою напругою

Виміряти напруги і струми можна і через вимірювальні трансформатори.

Тут слід зазначити дві основні особливості, відрізняючі схему випробування індукованою напругою від схеми досліді холостого ходу:

1. Оскільки при випробуванні індукованою напругою величина струму не вимірюється, а контролюється лише відсутність виткових замикань або грубих помилок в схемі, то амперметри можуть застосовуватися класу точності 1,5–2,5.

2. Амперметри повинні бути постійно включені в три фази. Перемикання одного амперметра на три фази, як це робиться при досліді холостого ходу, при випробуванні індукованою напругою неприпустимо, оскільки окремі поштовхи струму в одній фазі можуть залишитися непоміченими, якщо в цей час амперметр буде включений в іншу фазу.

При випробуванні ізоляції індукованою напругою трансформатор вважається тим, що витримав випробування, якщо не спостерігалось:

- а) поштовхів струму;
- б) порушення симетрії напруги по фазах (у трифазних трансформаторів);

в) виділення диму з отвору розширювача або кришки (якщо немає розширювача, які при випробуванні повинні бути відкриті);

г) перекриття на кулях (якщо трансформатор під час випробування був захищений кульовим розрядником).

Навіть в тих випадках, коли спостерігається миттєвий поштовх струму при випробуванні, а надалі трансформатор витримує випробування, він підлягає обов'язковому розбиранню, огляду і усуненню дефекту. Слід врахувати, що виткові замикання можуть «самоусунутися» в результаті часткового або повного вигорання заусенця на обмотувальній міді, заповнення пробитого проміжку маслом і т.д. Подальшими випробуваннями такий дефект (витковий замикання, що «самоусунулося») не завжди може бути знайдений, але в експлуатації трансформатор може дуже швидко вийти з ладу. Тому, навіть в тих випадках, коли при повторних випробуваннях витковий замикання не повторюється, трансформатор повинен бути обов'язково розібраний для визначення місця пошкодження і усунення дефекту.

Основним дефектом, який виявляється при такому випробуванні, є замикання між витками або між шарами обмотки, а також між відведеннями. Дуже важливо до розбирання трансформатора вимірюваннями струмів і напруг по фазах встановити, в якій саме фазі дефект або в якій фазі відбувся поштовх струму. Потім ця фаза піддається ретельному огляду. Дефектне місце обмотки може бути визначено методом «шукача».

Замикання між витками і шарами можуть бути викликані конструктивними недоліками, неправильним вибором ізоляції і дефектами виконання.

Найчастішими дефектами складання є: пошкодження ізоляції на обмотувальній міді; неправильне укладання витків в обмотці і неправильне виконання переходів між секціями; заусенці на обмотувальній міді; пошкодження ізоляції між витками унаслідок надмірного тиску при пресуванні обмотки. Якщо спостерігається дуже великий струм відразу при включенні

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 49   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

трансформатора при дуже малій напрузі, то це може бути результатом неправильного з'єднання обмоток трансформатора. В подібних випадках необхідно до повного розбирання перевірити правильність схеми обмоток.

### 3.4 Методи випробування напівпровідникових приладів

Підприємство-постачальник проводить контрольні випробування кожного вентиля, що випускається, і типові випробування кожного нового типу вентиля або вентилів з частково зміненими номінальними характеристиками. В об'єм контрольних випробувань входять: зовнішній огляд і перевірка відповідності кресленням, перевірка класу і групи вентиля, герметичності, електричної міцності і здатності навантаження. За заводом-виготівником повинно бути заміряно тепловий опір. Під час експлуатації періодично проводять зовнішній огляд, вимірюють зворотні струми, прямі падіння напруги і теплові опори. Всі випробування, якщо вони особливо не обумовлені, проводять при температурі  $20 \pm 10^\circ \text{C}$ . Для перевірки класу вентиля і вимірювання зворотного струму можна застосувати схему, показану на рис.4.7.а.

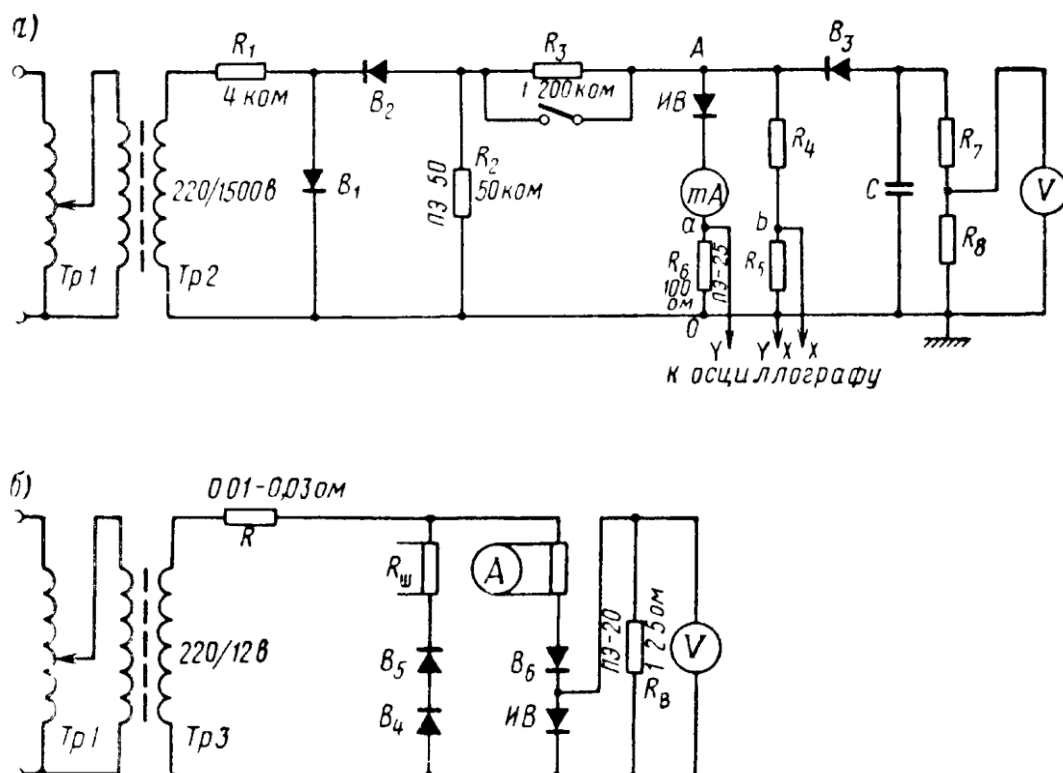


Рисунок 3.7 Схеми вимірювання зворотного струму (а) і падіння напруги (б).

В схемі використовують магнітоелектричний вольтметр, що підключається до виводів АО, електростатичний вольтметр і міліамперметр mA до 100 мА. Амплітуду зворотної напруги одержують, умножаючи показання магнітоелектричного вольтметра на 3,14. Зворотна напруга подається на випробовуваний вентиль ІВ через резистори R1, R3 і вентиль В2 від трансформатора Тр2, величина напруги на вході якого регулюється трансформатором Тр1 (ЛАТР 220 В). Пряма напруга шунтується вентилем В1 (десять послідовно з'єднаних діодів Д7Ж, зашунтованих резисторами по 30 кОм) і струм обмежується резистором R1 (два послідовно з'єднані резистори ПЕ-75). Резистор R2 служить початковим навантаженням і його підбирають такої величини, щоб вийти на лінійну частину вольт-амперної характеристики вентилля В2. Резистори R4 і R5 є дільником з 11 штук по 100 кОм; R7, R8 і С підбирають залежно від типу вольтметра.

Клас вентилля визначають таким чином. Вентиль поміщають в термостат і нагрівають до сталої температури  $140 \pm 5$  °С. Після цього на вентиль подають зворотну напругу і виміряють середнє значення зворотного струму. Зворотну напругу збільшують до загину зворотної гілки вольт-амперної характеристики, тобто до того моменту, коли невеликий приріст напруги викликає різке збільшення зворотного струму. Величину номінальної зворотної напруги встановлюють рівній 0,5 (звичайні вентилі) або близько 0,8 (лавинні вентилі) від максимального значення напруги, при якій починається загин вольт-амперної характеристики. Зворотну гілку вольт-амперної характеристики можна спостерігати за допомогою електронного осцилографа; для цього на одну пару пластин (Х-Х) подають зворотну напругу, а на іншу пару пластин (У-У)—напругу, пропорційну зворотному струму.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 51   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

За допомогою схеми рис. 3.7а можна зміряти і зворотні струми при будь-якому амплітудному значенні зворотної напруги.

Зворотний струм виміряють при максимально допустимій температурі електронно-дірчастого переходу ( $140^{\circ}\text{C}$ ); величина його не повинна перевищувати заданих значень.

Групу вентилів встановлюють по величині прямого падіння напруги. Цю напругу виміряють при пропусканні через клапан однополуперіодного синусоїдального струму частотою 50 Гц; заміряють середні значення струму і падіння напруги. Схема вимірювань показана на рис. 4.7б. Трансформатор Тр1 - є регулюючим, а Тр3— навантаженням з коефіцієнтом трансформації 220/12 в; резистор R служить для збільшення тривалості проходження струму через випробовуваний клапан ІВ до  $180^{\circ}$  ел. Клапан ІВ включають послідовно з клапаном В6 і шунтують резистором  $R_v = 1-2,5$  Ом; це роблять для того, щоб практично вся зворотна напруга прикладалася до клапана В6 і не впливала на точність вимірювань. Клапани з середнім значенням прямого падіння напруги 0,40-0,50 В відносять до групи А; 0,51-0,60 В— до групи Б і 0,61-0,70 В— до групи В. Розміри падіння напруги указують в паспорті і безпосередньо на клапанах.

Пряме падіння напруги виміряють також при пропусканні через клапан постійного струму. Слід мати на увазі, що в цьому випадку величину падіння напруги одержують приблизно в двічі більшій, ніж при вимірюваннях на змінному струмі.

Випробування навантажень проводять при номінальних значеннях струму і напруги і заданих перевантаженнях. Клапан не повинен пробиватися, і зміряний через 2 ч після закінчення випробувань зворотний струм не повинен перевищувати нормованих значень.

Електричну міцність можна перевірити, використовуючи схему рис. 3.7а.

Відповідно до ДСТУ «...клапани повинні протягом 10 сек витримувати без пробою амплітудну зворотну напругу, рівну полуторакратній номінальній зворотній напрузі при робочій температурі клапана».

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Для перевірки герметичності вентиль занурюють на 1-2 мін в нагріту до 80 °С воду; якщо протягом цього часу з вентиля не виділятиметься пухирців повітря, то вважають, що він витримав випробування. Можна також занурювати вентилі на 15 мін в етиленглицоль і гліцерин, нагріті до 125 °С.

Термостійкість до багатократних циклічних змін температури перевіряють, поміщаючи вентилі, не навантажені струмом, в камеру холоду з температурою мінус 40 °С на 2 ч, а потім в термостат з температурою 140 °С на такий же час. Після випробувань не повинна бути порушена герметичність і механічна міцність вентиля, а пряме падіння напруги і зворотний струм не повинне перевищувати максимально допустимих величин.

Для перевірки вологостійкості вентиль поміщають на 48 ч в камеру вологи з відносною вологістю  $95 \pm 3 \%$  при температурі  $40 \pm 5$  °С. Через 3 ч після витягання з камери і видалення вологи заміряють зворотний струм.

Вентилі випробовують також на механічну міцність. Ці випробування проводять на спеціальних стендах.

При випробуваннях на віброміцність вентилі прикріплюють до платформи вібраційного стенду, яка задає їм синусоїдальні коливання з частотою 50 Гц і прискоренням 7,5g. Вентилі піддають вібрації в двох взаємно перпендикулярних напрямках по 30 мін. Для перевірки удароміцності вентилі жорстко прикріплюють до платформи ударного стенду, яка задає їм удари з частотою повторення 20-80 ударів в хвилину і прискоренням 12 g; загальне число ударів (при випробуваннях в двох взаємно перпендикулярних напрямках) рівно 500.

Вентилі випробовують, не навантажуючи їх струмом; після випробувань виміряють зворотний струм і падіння напруги, їх значення не повинні перевищувати допустимих величин.

На стабільність характеристик вентилі випробовують протягом 100 ч при оточуючій температурі  $20 \pm 5$  °С і номінальних значеннях струму і напруги.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 53   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

### 3.5 Апаратурний контроль залишкового ресурсу трансформатора

В даний час велику увагу при роботі пристроїв залізничного транспорту надається надійності. В сучасних умовах кожна відмова викликає збиток у багато разів більший, ніж раніше. Тому питанню поточного контролю за станом устаткування, зокрема трансформатора тягових підстанцій, надається велике значення.

Хоча трансформатор є одним з найнадійніших апаратів пристроїв системи електропостачання, його ефективна і надійна робота залежить від правильного вибору номінальної трансформаторної потужності і правильної його експлуатації.

Вибір потужності трансформатора вище і нижче необхідної веде до економічних втрат. В першому випадку не використовується трансформатор по енергетичних параметрах, а це значить, що омертвлена деяка частина дефіцитних матеріалів. В іншому випадку відбувається прискорений знос ізоляції, що веде до швидкого виходу трансформатора з ладу.

По своїх енергетичних параметрах трансформатор повинен бути вибраний так, щоб він прослужив 25 років. Цьому відповідає середня відносна швидкість зносу ізоляції рівна 1.

В реальних же умовах, режим роботи трансформатора міняється, виникають вимушені режими, пов'язані з прискореним зносом ізоляції. У зв'язку з цим надзвичайно важливо контролювати використання ресурсу трансформатора і визначати ресурс, що залишився.

Це дозволить оперативно вибирати ефективні способи підвищення пропускної спроможності за системою електропостачання у вимушених режимах. Крім того, такий контроль дозволить планувати терміни посилення трансформаторної потужності тягових підстанцій.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 54   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Математична модель процесу зносу ізоляції представлена наступними виразами:

Швидкість відносного зносу ізоляції трансформатора

$$X=A \cdot e^{\alpha \theta} \quad (3.1)$$

Відносний знос за час  $T$  визначається з виразу

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T X \cdot dt \quad (3.2)$$

де:

$A$  – коефіцієнт пропорційності;

$\alpha$  – коефіцієнт, залежний від типу ізоляції;

$\theta$  – температура самої нагрітої точки обмотки.

Як видно з виразів (1) і (2) швидкість відносного зносу і відповідно відносний знос залежить від температури обмотки, яка визначається

$$\theta = \theta_m + \theta_{mo}$$

де:

$\theta_m$  – температура масла;

$\theta_{mo}$  – перевищення температури обмотки відносно масла.

Основна задача, це визначити перегрів обмотки над маслом, оскільки температура масла може бути зміряна безпосередньо з перетворенням в електричний сигнал.

Вихідним рівнянням за визначенням  $\theta_{mo}$  є диференціальне рівняння нагрівання обмотки

$$\tau \cdot d\theta/dt + \theta = \theta_y \quad (3.3)$$

де:

$\tau$  – постійна часу теплового процесу;

$\theta_y$  – стале значення перевищення температури обмотки над маслом.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 55   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

При переході від диференціального рівняння до рівняння в кінцевих різницях маємо:

$$\tau \cdot \Delta\theta_{\text{moi}} / \Delta t + \theta_{\text{moicp}} = \theta_{\text{моу}} \quad (4.4)$$

Значення  $\theta_{\text{moicp}}$ , як видно з рис.1, рівно:

$$\theta_{\text{moicp}} = \theta_{\text{moi-1}} + \Delta\theta_{\text{moi}} / 2 \quad (4.5)$$

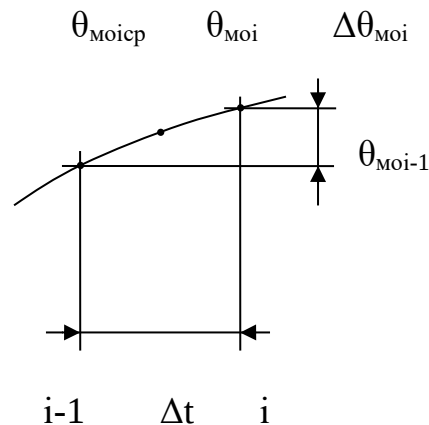


Рисунок 3.8 Визначення середнього перевищення температури обмотки над маслом на i-том кроці

При цьому вважаємо, що величина  $\theta$  в діапазоні  $\Delta t$  змінюється лінійно.

Підставивши  $\theta_{\text{moicp}}$  з (5) в (4), маємо

$$\tau \cdot \Delta\theta_{\text{moi}} / \Delta t + \theta_{\text{moi-1}} + \Delta\theta_{\text{moi}} / 2 = \theta_y$$

Вирішуючи це рівняння відносно  $\Delta\theta_{\text{moi}}$

$$\Delta\theta_{\text{moi}} = c(\theta_y - \theta_{\text{moi-1}}),$$

де

$$c = 1 / (2\tau/\Delta t + 1)$$

тоді

$$\theta_{\text{moi}} = \theta_{\text{moi-1}} + \Delta\theta_{\text{moi}}$$

чи

$$\theta_{\text{moi}} = c \theta_y + \theta_{\text{moi-1}}(1 - c)$$

але

$$\theta_y = a \cdot K^2 + b,$$

де

$K = I_{об} / I_n$  – відношення струмів обмотки і номінального

$a$  і  $b$  – коефіцієнти рівняння,  $a = 22,5$ ;  $b = 0,5$ .

Температура обмотки буде дорівнювати

$$\theta_{oi} = \theta_{moi} + \theta_m = \theta_{moi-1} + \Delta\theta_{moi} + \theta_m$$

Температура масла  $\theta_m$  – вимірюється датчиком.

При чисельній інтеграції рівняння зносу ізоляції можна записати у вигляді

$$\bar{X} = \frac{1}{T} \int_0^T X \cdot dt \approx \Delta t \sum_{i=1}^n \bar{X}_i$$

де

$\bar{X}_i$  – середня швидкість зносу на  $i$  – му кроці за  $\Delta t$ ;

$$\bar{X}_i = e^{\alpha \cdot \theta_i} = e^{\alpha \cdot (\theta_{i-1} + \Delta\theta_i)} = \bar{X}_{i-1} \cdot e^{\alpha \cdot \Delta\theta_i}$$

Розкладемо в ряд

$$e^{\alpha \cdot \Delta\theta_i} \approx 1 + \alpha \cdot \Delta\theta_i - \frac{\alpha^2 \cdot \Delta\theta_i^2}{2}$$

Розглянемо точність вимірювання залежно від кількості членів ряду.

Для обмотки: при  $\Delta t = 0,5$  мин.; при  $\tau = 5$  мин.

$$\frac{\tau}{\Delta t} = \frac{5}{0,5} = 10; \quad c = \frac{1}{20+1} = \frac{1}{21}; \quad \Delta\theta_i = \frac{\theta_y - \theta_{i-1}}{21}$$

Згідно виразу  $\theta_y = 22,5 \cdot K^2 + 0,5$  при номінальному навантаженні  $\theta_y = 23$  °С.

Тому із запасом приймемо  $\theta_{yi} = 23$  °С;  $\theta_{i-1} = 0$ ;  $\Delta\theta_i = \Delta\theta = \frac{23}{21} = 1,09$

$$\text{Тоді } \alpha \cdot \Delta\theta_i = 0,115 \cdot 1,09 = 0,126; \quad \frac{\alpha^2 \cdot \Delta\theta_i^2}{2} = \frac{0,115^2 \cdot 1,09^2}{2} = 0,0079$$

Отже третім членом розкладання можна нехтувати.

Тоді середню швидкість зносу на  $i$  – му кроці можна визначити по формулі:

$$\bar{X}_i = \bar{X}_{i-1} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta_i); \quad \Delta\theta_i = \theta_{mi} - \theta_{mi-1} + \Delta\theta_{omi}$$

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.РД.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Виходячи з викладеного, пропонується наступний алгоритм розрахунку швидкості зносу і відносного зносу ізоляції трансформаторів, рахуючи  $\alpha$ ,  $c$ ,  $I_n$  відомими величинами.

Функціональна схема пристрою, що реалізує запропонований алгоритм представлена на рис.3.9, в блоках якої виконуються наступні етапи алгоритму:

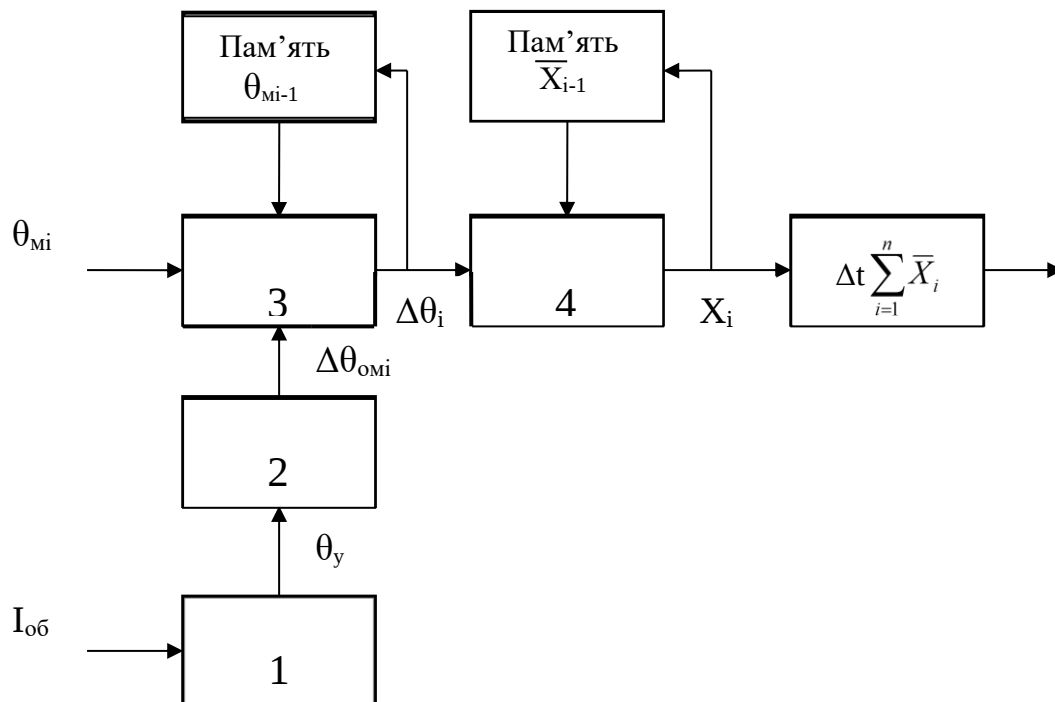


Рисунок 3.9 Функціональна схема пристрою

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведена робота з аналізу ушкоджень і несправностей тягових трансформаторів. Представлені основні методи випробування ізоляції а також дослідження методів визначення місця короткого замикання в обмотках тягових трансформаторів. Вказані необхідні випробування тягових трансформаторів високої напруги, дозволяючі вимірювати електричну міцність, тангенса кута діелектричних втрат та опір ізоляції. Були представлені схеми установки для проведення випробувань даними методами.

Були представлені методи діагностування стану тягових агрегатів, а саме алгоритм діагностування стану тягового трансформатора, випробовування індукованою напругою та методи випробовування напівпровідникових приладів.

|      |     |          |        |      |                           |     |
|------|-----|----------|--------|------|---------------------------|-----|
|      |     |          |        |      | 02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ | Арк |
|      |     |          |        |      |                           |     |
| .Змн | Арк | № докум. | Підпис | Дата |                           |     |

НАПБ А.01.001-95 Правила пожежної безпеки в Україні. N 400

від 22.06.95. Про введення в дію Правил пожежної безпеки в Україні  
Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 14 липня 1995 р.

«Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей» К.:  
Основа, 1998 – 384 с.

Сыченко В.Г. Матусевич А.А., Рогоза А.В., Павличенко М.Е., Васильев И.Л.,  
Пулин Н.Н. «Повышение энергетической эффективности в  
эволюционирующих системах электроснабжения» Вісник Національного  
технічного університету «Харківський політехнічний інститут». № 27(1249),  
с. 182-186. 2017

Правила технічної експлуатації залізниць. Київ, Україна: 1997. 48 с.

О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, Є.В. Зорін, «Аналіз  
стійкості енергетичних систем за напругою», Технічна електродинаміка.  
№3 с. 59-66. 2010.

В.М. Авраменко, П.О. Черненко, Н.Т. Юнєєва, «Оцінювання поточного  
запасу статичної стійкості енергосистеми з використанням оперативного  
прогнозу вузлових навантажень», Вісник Вінницького політехнічного  
інституту. № 1, с. 90-93. 2013.

Стійкість енергосистем. Керівні вказівки: СОУ-Н МЕН 40.1 – 00100227 –  
68: 2012.– Київ, Україна: ГРІФРЕ: Міненерговугілля України, 2012. – 35 с.

В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саєнко, Д.А. Босий Якість електричної енергії у  
тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія/ За редакцією  
В.Г. Сиченка – Дн-вск: Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015.-344с.-  
ISBN 978-966-97463-8-2

Правила улаштування систем тягового електропостачання залізниць України, затверджені Наказом Укрзалізниці від 24.12.2004 р. № 1010-ЦЗ.

ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрДНЦ», 2014, 32 с

Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ від 25.07.2006 № 258 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (дата звернення 11.07.2019).

Правила улаштування електроустановок. Офіц. вид.; чинний від 21.07.2017. Київ, 2017. 617 с.

Панасенко Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / [Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров, и др.]. – Киев. : Залізничний транспорт України, 2007.– № 4. – С. 76–80.

Гончаров Ю. П. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму / [Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко та інш.]. // Електротехніка і Електроенергетика, 2007.– №2.– С. 4–11.

Гончаров Ю. П. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двохопераційних напівпровідникових приладах / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко. – К. : Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки НАН України, 2008. – Ч.2. –С. 16–21.

Пат. 51917 Україна, МПК(2009) H02M 7/00. Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму / Божко В. В., Панасенко М. В., Гончаров Ю.П., Сиченко В.Г.; заявники та власники патенту автори; заявл. 15.01.2010 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.

Божко В.В. Стабілізуючі перетворювальні агрегати вольтододааткового типу підвищеної ефективності для тягового електропостачання постійного струму електрифікованих залізниць. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Харків – 2010.

Гончаров Ю. П. Перетворювальна техніка. Ч.2 / [Ю. П. Гончаров, О. В. Будьоний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко та ін.]. – Харків. : Фоліо, 2000.– 360 с.

Лагута І.І. Перетворювальний агрегат з коефіцієнтом потужності близьким до 1 для тягової підстанції системи електропостачання постійного струму напруги 3 кВ / І.І. Лагута, М.В. Панасенко, М.В. Хворост. – Днепропетровск. : Тезисы докладов I междунар. научн.-практ. конф. „Транселектро-2007”. – ДИИТ, 2007.

Мартиненко, В. А., Нові високопотужні діоди і тиристори для промисловості, транспорту та енергетики. / В. А. Мартиненко, Г. Д. Чумаков / Силова електроніка. – 2005. Вип. 1. – С.64 – 66.

Закон України “Про Електроенергетику” із змінами внесеними згідно Законів № 1812-III (1812-14) від 08.06.2000 року, № 1821-IV (1821-14) від 22.06.2000 року.

Праховник, А.В. Контроль ефективності енерговикористання - ключова проблема управління енергозбереженням [Текст] / А.В. Праховник, В.Ф. Находов, О.В. Борисенко / Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.- 2009.- №8(66).- С.41-54.