

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Савченко Людмила Григорівна**

УДК 621.359.4

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Аналіз та обґрунтування застосування пристроїв регулювання напруги  
силових трансформаторів в умовах змінних навантажень та коливань  
вхідної напруги.**  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

**Савченко Л. Г.**

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

**Соколовський О.Ф.**

(прізвище, ім'я, по батькові)

**к.т.н., доцент кафедри електрифікації,  
автоматизації виробництва та інженерної екології**  
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

## АНОТАЦІЯ

Савченко Л. Г. 1. Аналіз та обґрунтування застосування пристроїв регулювання напруги силових трансформаторів в умовах змінних навантажень та коливань вхідної напруги. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Силові трансформатори є критичним елементом електричних мереж, відповідальним за перетворення напруги для передачі та розподілу електроенергії. Збереження стабільного рівня напруги в електричній мережі є важливим для забезпечення ефективної роботи обладнання та запобігання його пошкодженню. В умовах змінних навантажень та коливань вхідної напруги, застосування пристроїв регулювання напруги для силових трансформаторів стає необхідним для підтримки стабільної напруги на вихідних клеммах.

**Ключові слова:** Силові трансформатори, пристрої регулювання напруги, електрична дуга, турбіна.

## ABSTRACT

Savchenko L. G. 1. Analysis and justification of the use of voltage regulation devices for power transformers under variable loads and input voltage fluctuations. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Power transformers are a critical element of electrical networks, responsible for voltage transformation for the transmission and distribution of electricity. Maintaining a stable voltage level in the electrical network is important for ensuring the efficient operation of equipment and preventing its damage. Under variable loads and input voltage fluctuations, the use of voltage regulation devices for power transformers becomes necessary to maintain a stable voltage at the output terminals.

**Keywords:** Power transformers, voltage regulation devices, electric arc, turbine.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ	7
1.1. Основні вимоги до роботи РПН і ПБВ	7
1.2 Перемикаючий пристрій RS9	14
1.3 Перемикаючий пристрій Huaming	20
1.4 Пристрій РПН типу РНТА	21
1.5 Використання систем моніторингу СМТ-РПН, TDM для підвищення надійності та контролю	27
Висновок по першому розділу	30
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ	32
2.1 Методи діагностування РПН	33
2.2 Пропозиції щодо підвищення надійності пристроїв регулювання напруги	39
Висновки по другому розділу	41
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВИБОРУ РПН ДЛЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	42
3.1. Необхідність вибору РПН для силових трансформаторів	42
3.2. Розрахунок та вибір РПН для трансформатора	43
Висновки по третьому розділу	45
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	49

## Вступ

В даний час досить швидкими темпами розвиваються системи електропостачання, електростанції та підстанції. Для перетворення напруги та передачі електричної енергії використовуються трансформаторні підстанції.

Все обладнання, яке застосовується на трансформаторній підстанції, вибирається виходячи з норм технологічного проектування, проходячи всі необхідні перевірки. Одним із головних елементів на перетворювальній підстанції є силовий трансформатор.

Для виробництва трансформатора необхідно виконати техніко-економічні розрахунки (тепловий розрахунок, електромагнітний розрахунок тощо). Після виконання розрахунків та створення попереднього габаритного креслення, йде підбір комплектуючих трансформатора, вибір будови бака, розробка креслень розширювача, розробка активної частини, відводів та обмоток трансформатора.

Також виробляються і економічні розрахунки при виборі комплектуючих та матеріалів (оскільки багато матеріалів імпортуються), зазвичай ціна трансформатора не менше ніж 1000000 грн. без урахування ПДВ, але при цьому ціна залежить і від потужності трансформатора, чим вища потужність, тим дорожчий трансформатор.

**Об'єкти дослідження** в даній роботі зосереджені на системах електропостачання, електростанціях та підстанціях.

**Метою кваліфікаційної роботи** є підвищення надійності систем регулювання напруги в силових трансформаторах. Для реалізації цієї проблеми були розглянуті види перемикаючих пристроїв, їх конструктивні особливості та додаткові прилади, які використовуються при експлуатації перемикаючих пристроїв у трансформаторах. Завданнями роботи є:

1. Аналіз пристроїв регулювання напруги в силових трансформаторів.
2. Аналіз методів діагностики та розробка заходів щодо підвищенню надійності пристроїв регулювання напруги у силових трансформаторах.
3. Техніко-економічний розрахунок вибору РПН для силових

трансформаторів.

Для того, щоб робота об'єктів електроспоживачів була надійною і безаварійною, потрібно забезпечити мінімально можливе відхилення фактичної величини напруги, що підводиться. А щоб уникнути цих відхилень необхідно регулювати напруги на трансформаторі.

Силові трансформатори комплектуються пристроями РПН (регулювання напруги під навантаженням) та ПБВ (пристрій перемикання напруги без збудження).

**Актуальність** цієї теми обумовлюється тим, що понад 80% створених трансформаторів комплектуються системами РПН. «Окрім цього, пристрій РПН більш надійний ніж ПБВ, так як при регулюванні напруги не потрібно відключати трансформатор від мережі, тим самим, не відключаючи споживача від мережі» [3].

Пристрої ПБВ (пристрій перемикання напруги без збудження) є більш компактними і простими в монтажі, але перемикач ПБВ менш надійний, ніж пристрій регулювання напруги під навантаженням (РПН) у зв'язку з тим, що ПБВ можна застосовувати на мережах, де немає такого серйозного споживання електричної енергії.

#### **Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

1. Савченко Л. Г.

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СМТ-РПН, TDM ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА КОНТРОЛЮ– 2025» ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ 30 жовтня 2025 року м. Житомир.

2. Савченко Л. Г., Ступак А. А.

ПОРОГОВІ ЗНАЧЕННЯ ТА АВАРІЙНІ СИГНАЛИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ: МЕЖІ ТРИВОГИ Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2.

3. Зленко В. В., Савченко Л. Г.

СТРАТЕГІЇ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ НЕСПРАВНОСТЕЙ (FDI) В ЕНЕРГЕТИЦІ «Біоенергетичні системи» ІХ Міжнародна науково-практична конференція, Житомир, Україна, 19-20. 11. 2025

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ У СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

#### 1.1 Основні вимоги до роботи РПН і ПБВ

Існують кілька варіантів перемикання відгалуження напруги. Один із варіантів – це перемикання напруги за допомогою повного відключення трансформатора від мережі (ПБВ). Оскільки величина напруги прямо пропорційна кількості витків обмотки трансформатора, то змінюється і коефіцієнт трансформації і отже напруга на даній обмотці. Даний пристрій є перемикачем, що здійснює ступінчасте перемикання між положеннями обмотувальних витків. Пристрій ПБВ можна встановити на низькій обмотці або обмотці високої напруги. Головним плюсом при монтажі пристрою ПБВ на обмотці високої напруги є параметри струму та напруги, струм на стороні високої напруги ВН менший ніж на стороні низької напруги.

Щоб ПБВ переключити на наступне потрібно послабити фіксатор приводу, і далі зробити поворот за допомогою рукоятки приводу, в потрібне положення, після чого фіксатор необхідно повернути в перше положення.

Пристрої перемикання ПБВ, в конструкціях яких передбачені електроприводи перемикаються дистанційно шляхом подачі керованих імпульсів. Крім цього, управління такими перемикачами можна виконувати керування і в ручному режимі. У разі потреби зміни напруги на споживачах варто звернути увагу, що ПБВ може змінити величину напруги в обмежених межах на обмотці, яка знаходиться на стороні ПН, а саме  $\pm 5\%$ . Якщо спостерігається ситуація, де в мережі з'являються значні відхилення напруги, то регулювання напруги відбувається на живлячих підстанціях, або на більших об'єктах електроенергії. Головний недолік ПБЗ полягає в тому, що при перемиканні відгалуження і регулюванні напруги необхідно повністю відключати трансформатор від мережі [1]. Саме тому трансформатори з перемикаючим пристроєм ПБЗ використовуються в мережах, де потрібне нечасте регулювання напруги, а саме під час сезонних пікових навантажень (зима, літо тощо), з

дотриманням при цьому категорії надійності електрообладнання споживача (вона повинна дозволяти здійснити таке перемикання). Також споживач повинен мати наявність двох незалежних джерел живлення або резервного джерела живлення, що працює за допомогою системи АВР, цим мінусом можна знехтувати, оскільки в такому випадку при здійсненні перемикань відгалуження установки ПБЗ краще ненадовго перевести навантаження на друге джерело живлення.

Окрім цього, мінусом також є окислення контактів на відгалуженні перемикаючого пристрою РПН (регулювання під навантаженням) в процесі експлуатації силового трансформатора. Оскільки контакти окислюються, то відбувається підвищення опору контактних поверхонь, а в подальшому це призводить до нештатних ситуацій, під час яких може спрацювати релейний захист та газовий захист (якщо встановлено реле Бухгольца). Щоб запобігти даній несприятливій ситуації, слід не менше двох разів на рік проводити повне відключення трансформатора від мережі та здійснювати пару циклів перемикання відгалуження для видалення плівки, яка може утворитися при окисленні контактів. Основними виробниками РПН у світі є Hyundai (Болгарія), MR (Німеччина), Huaming (Китай).

Окрім перемикаючих пристроїв ПБЗ для регулювання напруги застосовуються ті, за допомогою яких можна здійснювати регулювання напруги під час роботи трансформатора, РПН, за допомогою даного пристрою можливо регулювати напругу під навантаженням. За допомогою установок РПН можна проводити регулювання на вторинній обмотці в найбільш широких межах [2]. Для забезпечення найбільш ефективної роботи в установках РПН слід встановлювати струмообмежувальні елементи (блок резисторів або блок реакторів).

При роботі пристрою РПН в ньому виникає електрична дуга. Щоб уникнути забруднення ізолюючої оливи, все обладнання РПН встановлюється в окремий герметичний бак, який не контактує з оливою трансформатора в основному баку трансформатора. Всі пристрої, які створюють або зменшують

струм, розташовані в окремому баку РПН, а саме це блок резисторів або реакторів, що обмежують струми. Даний метод враховує навантаження контактів жорсткої пружини, що дозволяє контактам зменшити час перемикання відгалуження на обмотках за допомогою струмообмежувального елемента.

Можливість застосування спеціальних регулювальних трансформаторів струму, підключених послідовно, дозволяє змінювати коефіцієнт трансформації завдяки властивостям спеціальних трансформаторів (зміна рівня напруги та фази). Але їх застосування є малопоширеним через дуже високу вартість пристрою та здійснення монтажних робіт.

При використанні РПН переходи між відгалуженими обмотками без переривання струму можливі при використанні системи двох паралельних перемикачів (п1 та п2), які, у свою чергу, повинні бути замкнуті на струмообмежувальний елемент, підключений до середньої точки обмотки трансформатора. Реактор має форму трифазної котушки індуктивності, в якій застосовується сталевий сердечник із зазорами. Він встановлюється на верхній або нижній ярмових балках.

Регулювальна обмотка, яка з'єднується з перемикальним пристроєм, буде додавати напругу до першої обмотки, а потужність цієї обмотки дорівнюватиме діапазону регулювання. Це рішення передбачає збільшені розміри трансформаторного обладнання, навіть незважаючи на низькі межі регулювання, оскільки буде велика витрата матеріалів при створенні активної частини трансформатора.

Регулювальну обмотку встановлюють у нижній частині камери, де розташована активна частина. Регулювальна обмотка входить до вузла додаткового регулювання, до якого входять тахогенератор і кремнієвий випрямляч. Зазвичай регулювальна обмотка ділиться на два складові вузли (тонке та грубе регулювання), розміщені зовні основної обмотки двома концентричними. Ізоляція основної частини обмотки ВН від регулювальної аналогічна ізоляції між обмотками ВН і НН. Секція регулювальної обмотки замкнута на реактор. Перемикач П знеструмлений. Напруга на регулювальній

обмотці змінюється перемиканням ступенів перемикача під навантаженням, через що вимірюється коефіцієнт трансформації між обмотками.

Для трансформаторів з ПБН розміщують п'ять відводів регулювання напруги з перемиканням в межах п'яти відсотків від номінальної напруги. Відводи, що знаходяться посередині, дорівнюють номінальній напрузі.

При розміщенні регулювальної обмотки на головних стрижнях сердечника слід врахувати зауваження при розміщенні первинної обмотки.

РПН працюють за принципом селекторного перемикання, тобто вибірник і перемикаючий пристрій працюють як одне ціле. Обладнання РПН встановлюється всередині бака трансформатора. Але можливе проведення монтажних робіт на ярмовій балці або на кришці бака. РПН поставляється готовим до монтажу всередині бака, що полегшує процес установки. Всі комплектуючі, пов'язані з роботою РПН, поставляються в самому корпусі перемикаючого пристрою. В рух даний механізм приводиться за допомогою моторного приводу, встановленого на стінці бака трансформатора, і з'єднується за допомогою валів, редукторів і кабелів [3].

Регулювання відбувається на стороні високої напруги в діапазоні  $\pm 10\%$  від номінальної напруги. Конструкційною основою РПН є складні моделі перемикаючих пристроїв марок (РНТА, RS та MR).

Конструктивно система керування РПН виконана у формі єдиного блоку:

1. Механізм перемикання.
2. Перемикач положень відгалуження напруги.
3. Попередній вибірник.

Електродвигун, як виконавчий елемент, встановлюється безпосередньо в механізм управління.

Механізм перемикання реалізує:

1. Перемикання.
2. Електричний сигнал блокування, якщо перемикання пристрою проходить через крайні положення.

3. Здійснення електричного блокування електродвигуна при перемиканні вручну за допомогою рукоятки моторного приводу.

4. Здійснюється механічне блокування, якщо перемикачі за крайні положення.

Пружинний механізм встановлюється в перемикач відгалуження, і при зникненні напруги в ланцюзі живлення електродвигуна або в схемі керування під час перемикання, дана пружина здійснює встановлення контактної системи у фіксоване положення. Сам же механізм керування виготовлений з циліндра та вбудованих в нього нерухомих контактів. Барабан і група контактів сконструйовані в ізоляційному циліндрі, завдяки цьому рішення було забезпечено достатню механічну міцність системи рухомих і нерухомих контактів, також зменшено відхилення зусиль контактних положень, щоб підвищити час експлуатації перемикального пристрою. Ізоляційний циліндр контактного барабана являє собою герметичну конструкцію, через що змішування трансформаторних олій перемикального пристрою та основного бака не відбудеться [3].

У нижній частині перемикача розташований перемикач вибору, що має у своєму складі рухомі та нерухомі контакти резерву та нейтралі. Нерухомі контакти мають срібне покриття для забезпечення кращої провідності.

До складу пристрою РПН зазвичай входять покажчики положення:

5. Видимий через віконце на кришці перемикального пристрою (для контролю).

6. Покажчик положення, що встановлюється на кожух, для зручного монтажу та візуального контролю з землі (без використання драбин).

7. Датчики положення РПН для дистанційного контролю [9].

Також РПН слід комплектувати двома контакторами та струмообмежувальним елементом, з двома регулювальними обмотками. Під час процесу регулювання відбувається перемикання одного відгалуження контактів на наступне відгалуження контактів, при цьому відбувається автоматичне

коротке замикання обмотки, з появою додаткової індуктивності, що і забезпечує перемикання без різких зростань струму.

Існує два види струмообмежувальних елементів, що застосовуються в РПН – це використання резисторів або реакторів. На виводах таких трансформаторів отримується відрегульована напруга. Під час перемикання перемикальний пристрій спочатку проходить через усі відгалуження вибірника при фіксованому положенні попереднього вибірника, отже, регульовальна обмотка виявляється знеструмленою і перемикання здійснюється на половину повного діапазону. Щоб реалізувати можливість перемикання попереднього вибірника без розривання ланцюга, потрібно додати ще один нерухомий контакт у вибірнику. Якщо підключати ступінь грубого регулювання, то потрібно підключити її до основної обмотки трансформатора. Після здійснення перемикання попереднього вибірника, вибірник проходить всі свої положення при згодному включенні регульовальної обмотки або при грубому регулюванні. Також використовуються схеми з додатковим (некомутованим) ступенем регулювання з реверсом або збільшене число витків при застосуванні ступеня загального регулювання. Щоб виключити вільні потенціали для усунення (вільних потенціалів) іноді між регульовальною обмоткою і основною обмоткою ставлять спеціальні резистори. Крім цих способів є ще один – це послідовне підключення трансформаторів що додають напругу, але оскільки даний спосіб дуже затратний у зв'язку з купівлею обладнання і складністю в монтажі, він не часто використовується.

Для того, щоб обрати найбільш вигідний пристрій РПН, необхідно розглянути його конструкцію, ціну та характеристики. Подальший розгляд теми буде представлено в наступних розділах. Як було описано вище, ПБВ – це перемикання відгалуження без збудження трансформатора, тому для здійснення регулювання напруги слід повністю відключити трансформатор від мережі. Для забезпечення більшої безпеки для оперативного та ремонтного персоналу необхідно встановити видимий розрив кола та передбачити пристрої захисного заземлення. У комплектацію пристроїв РПН входить моторний привід, що

працює за допомогою електродвигунів. Перемикання відгалуження РПН може здійснюватися дистанційно за допомогою шафи управління, а також можливо за допомогою релейних установок та автоматики. Крім цього, розглядається варіант управління перемиканнями відгалуження регулювання за допомогою ручного важільного приводу, якщо моторний привід має несправності або на ньому відсутнє живлення. «Для того, щоб обрати найбільш вигідний пристрій РПН, необхідно розглянути його конструкцію, ціну та характеристики. [4].

Для початку розглянемо вимоги до конструкцій, форма та розміри бака повинні забезпечувати можливість встановлення РПН в сам бак трансформатора. Покриття РПН повинні наноситися за спеціальними умовами, за допомогою фарбопультів. Ці покриття повинні захищати від корозії та впливу вологи та інших факторів. Також конструкція повинна передбачати безпроблемне транспортування РПН в розібраному вигляді. Механізм керування повинен бути сконструйований таким чином, щоб, при припиненні перемикання через падіння напруги, або вплив струмів коротких замикань, була безаварійна робота [4].

Якщо РПН працює в маслі, при експлуатації в температурних умовах нижче нуля, то обов'язково повинен мати датчик температури масла (термоопір), що дозволяє встановити блокування перемикання, якщо температура нижче  $-25^{\circ}\text{C}$ . Якщо бак РПН зроблено герметичним, то необхідно, щоб він міг витримати випробування тиском 4,5 кПа протягом двох годин або 3 кПа протягом доби. Якщо є бак з розривом дуги в маслі (дугогасні контакти), то обов'язково повинна бути можливість зняття проб масла, заміни та промивання бака. Крім цього, якщо бак контактора зроблено герметичним, то він повинен мати можливість вакуумування спільно з баком трансформатора, але цей параметр залежить від технології монтажу.

В пристроях РПН в обов'язковому порядку повинні бути прилади захисту (струменеве реле), які спрацьовують на сигналізацію для запобігання поломкам.

РПН повинен мати можливість дистанційного керування та автоматичного за допомогою показчиків положення та датчиків. За згодою між сторонами РПН може не комплектуватися датчиком положення. У складі моторного приводу

необхідно передбачити електричне та механічне блокування, яке повинно спрацювати перед блокуванням механізму перемикачів. Також захист повинен бути передбачений для електродвигуна приводу.

Для проведення налагоджувальних робіт має бути передбачене ручне керування приводом за допомогою рукоятки.

За узгодженням між споживачем і виробником може бути зменшено кількість видів керування. При цьому автоматичне керування є обов'язковим [2].

## 1.2 Перемикаючий пристрій RS9

Перемикаючі пристрої марки RS9 призначені для зміни коефіцієнта трансформації в силових трансформаторах. Оскільки ці перемикаючі пристрої мають високу надійність, вони також можуть застосовуватися в пічних установках та в електролізних трансформаторах тощо. Перемикаючий пристрій показано на рисунку 1.



Рисунок 1 – Перемикаючий пристрій типу RS9

Перемикаючі пристрої RS9 виготовляються у двох типах виконання несучих фланців для встановлення в бак трансформатора (круглий і монтажний фланець дзвонового типу). ПУ RS9 розроблено на принципі роздільної комутації,

тобто процес, по часу і місцю, відокремлений від процесу перемикання під навантаженням. Бажане положення вибирається перемикачем без струмового вибору. Кожна фаза має по два ряди нерухомих контактів. Непарні відгалуження підключаються до одного ряду. На кожному ряду нерухомих контактів працює тільки один рухомий контакт. Відгалуження, де розташовані парні та непарні контакти, здійснюють почергові кругові рухи, що дозволяє непарним контактам вільно та без струму вибрати положення регулювання, в той час як по парних контактах протікає струм. В момент, якщо непарні контакти є провідними струм, то вибір положення може бути здійснений парними контактами, також без струму. Після того, як закінчується вибір відгалуження, контактор перекидає навантаження на наступну сходинку регулювання. Контакттор сконструйований таким чином, що струм навантаження не припиняється під час перемикання, також відгалуження між собою не підлягають шунтуванню. Реалізувати це можливо при використанні допоміжних контактів, які на певний час активують резистори з невеликим опором. Якщо необхідно збільшити число положень, застосовується предиктор, який можна сконструювати як грубий предиктор або як реверсор. Якщо використовувати предиктор як реверсор, то електрорушійна сила в перемикачі підсумовується з електрорушійною силою активної обмотки, а якщо перемикати в зворотну сторону, то дані ЕРС віднімаються. Якщо застосовувати грубий предиктор, використовується ступінь грубого регулювання в регулювальній обмотці. При використанні грубого предиктора вмикається і вимикається грубий ступінь трансформаторної обмотки. Якщо використовувати вузький діапазон регулювання перемикаючого пристрою, і без предиктора, зазвичай він може бути застосований для малопотужних трансформаторів ТМН. Всі інші технічні дані для них однакові.

Рухомий ізоляційний вал ПБЗ марки RS9 для передачі моменту обертання від верхнього редуктора до контактора та вибірника структурно розташований зовні бака ПБЗ, тобто в порожнині бака трансформатора. За потреби обслуговувати цей вал ПУ, потрібно проводити розгерметизацію бака трансформатора та зливати масло з ПБЗ, а далі через оглядові люки проводити

роботи з ревізії всередині бака трансформатора. Далі розглянемо, де розташовується акумулятор енергії в RS 9.3, який знаходиться під резисторами в нижній частині контактної системи, через це проводити ревізію акумулятора досить проблематично. «В конструкції ПБЗ типу RS 9.3 відсутня слабка точка (запобіжник), тому в разі поломки або несправності зламається сам механізм ПБЗ, що призведе до суттєвих часових і великих фінансових втрат на відновлення перемикаючого пристрою» [5].

Перемикальний пристрій MR. Пристрій постачається у вологозахищеній упаковці. Вони можуть також постачатися у вигляді комплекту пристроїв РПН зі спільним моторним приводом. Пристрій зображено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Перемикальний пристрій MR

Приєднання трубопроводів Q закрито глухою кришкою. Приєднання трубопроводів R і Q можна міняти місцями. Приєднання трубопроводів S. Трубне коліно на приєднанні трубопроводів S обладнане болтом для випуску повітря. До нього під'єднується трубопровід, який прокладено збоку по стінці бака трансформатора і закінчується зливним краном на висоті обслуговування.

Якщо пристрій РПН оснащена сифонною трубкою, через приєднання трубопроводів S можна повністю злити масло з пристроєм РПН. Приєднання трубопроводів R. Приєднання трубопроводів R призначене для встановлення захисного реле, а також для під'єднання розширювального бака пристроєм РПН.

Розглянемо принципи перемикання.

Принцип «контактор — селектор». Перемикальні пристрої, що працюють за цією системою, включають в себе контактор і селектор положення. Селектор застосовується для попереднього вибору необхідного положення, яке підключається через нього до знеструмленої сторони контактора.

Далі відбувається поворот двигуна (контактор перемикається), і робочий струм проходить через дане положення. Моменти перемикання селектор і контактора синхронізуються за часом» [6]. Схема перемикання зображена на рисунку 3.

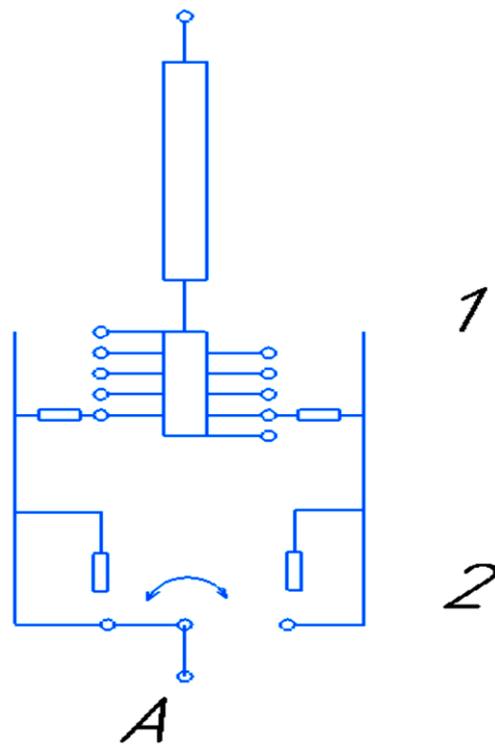


Рисунок 3 – Схема перемикання за принципом «контактор – селектор»

Принцип «селектор під навантаженням». Перемикальний пристрій, що працює за даною схемою, поєднує в собі властивості контактора та селектора.

Перемикання з одного положення на інше відбувається за один цикл. Відмінність звичайного селектора під навантаженням від селектора під навантаженням з гасінням електричної дуги у вакуумі полягає в тому, що контакти у звичайному вибірнику, через які відбувається вибір положення, також виконують роль контактора перемикального пристрою. Схему зображено на рисунку 4.

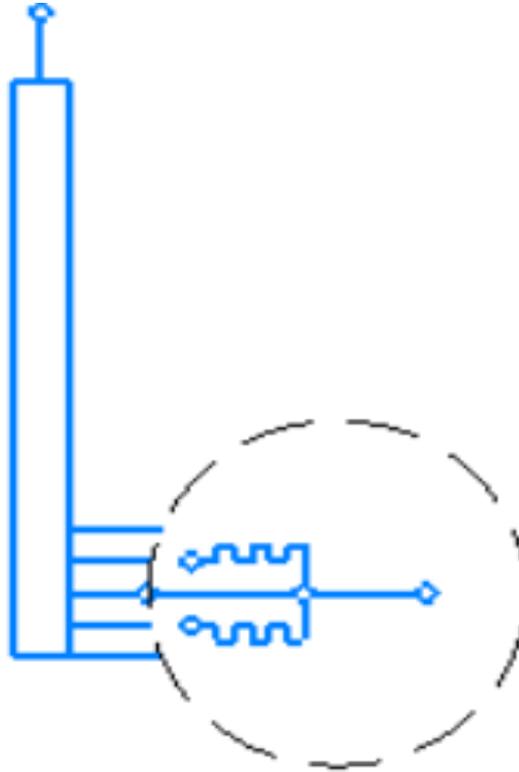


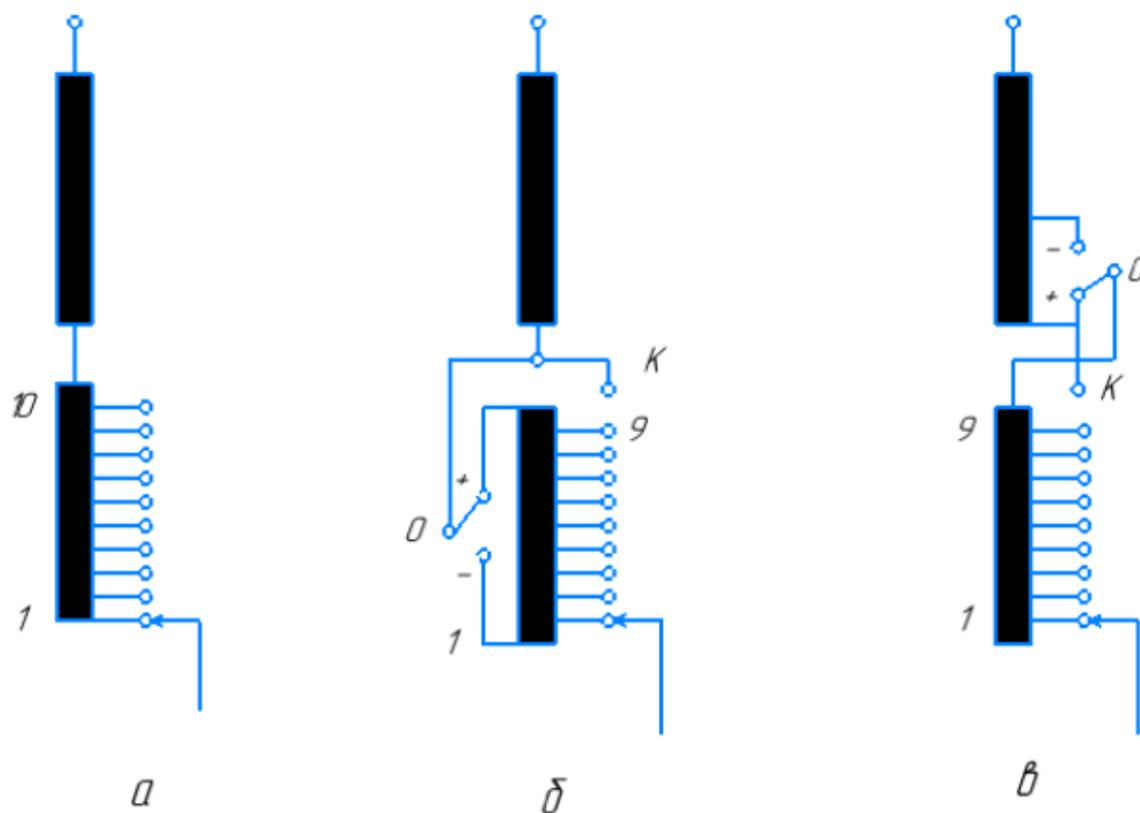
Рисунок 4 – Схема перемикання за принципом «селектор під навантаженням»

У даних схемах з'єднань вказуються маркування приєднувальних контактів вибірника та робочих положень для конкретного перемикального пристрою, замовленого за опитувальним листом. Маркування контактів, що використовуються в складальних і габаритних кресленнях перемикального пристрою, завжди відповідає маркуванню, вказаному згідно з внутрішніми стандартами компанії MR.

Маркування моторного приводу перемикального пристрою та самі контакти положень є однаковими. Принципові схеми зображені на рисунку 5.

Розглянемо принцип роботи. Пристрій РПН використовується для регулювання коефіцієнта трансформації трансформаторів без повного відключення трансформатора від навантаження.

Також, цим способом можна компенсувати коливання напруги, які виникають у лініях електропередачі. Для цього пристрої РПН вбудовуються в трансформатори та підключаються до їх активної частини.



а - без передвмикача, б - з реверсом, в - з перемикачем грубого ступеня

Рисунок 5 – Принципові схеми пристрою РПН типу MR

Моторний привід, що отримує керуючий імпульс (наприклад, від регулятора напруги), змінює робоче положення пристрою РПН, в результаті чого відбувається необхідне коригування коефіцієнта трансформації трансформатора.

Приводний вал забезпечує механічне з'єднання між приводом і пристроєм РПН або ПБЗ. Зміна напрямку осі обертання валу з вертикального на горизонтальне здійснюється за допомогою кутового редуктора.

Виходячи з цього, вертикальний приводний вал слід встановити між кутовим редуктором і моторним приводом, а горизонтальний – між самим перемикаючим пристроєм РПН і кутовим редуктором. Далі проводиться монтаж РПН в бак трансформатора [6].

### **1.3 Перемикальний пристрій Huaming**

Перемикальний пристрій РПН виду СМ, конструктивно що складається з механізму перемикання, який в свою чергу складається з контактора та вибірника, моторного приводу, використовується в силових маслонаповнених трансформаторах.

У масляний бак трансформатора встановлюється механізм перемикання разом із контактором. Контакттор виконано також в окремому герметичному баку, в той час як до регулювальної обмотки трансформатора приєднується вибірник, який повністю занурений у трансформаторну оливу в баку перемикального пристрою.



Рисунок 6 – Пристрій РПН Huaming

У трифазних перемикальних пристроях РПН типу СМ найчастіше застосовуються схеми з'єднань відгалужень "зірка з нейтральною точкою", або використовують три однофазні перемикальні пристрої одного типу виконання та параметрів, виготовлені під будь-який тип з'єднання обмоток силового трансформатора. Пристрій РПН від марки Huaming зображено на рисунку 6.

Контактор підлягає заміні після 800 000 перемикань.

З метою безпеки, на новому пристрої РПН рекомендовано провести перше технічне обслуговування через два роки після введення в експлуатацію або через 20 000 перемикань, залежно від того, що настане раніше [3].

Для підвищення надійності технічне обслуговування слід проводити один раз на п'ять років (або один раз на сім років, якщо пристрій обладнаний масляним фільтром).

#### **1. 4 Пристрій РПН типу РНТА**

Пристрій РПН типу РНТА встановлюють у нейтралі обмоток ВН. РНТА-У-35/200Р-16/20-93У1 призначений для здійснення регулювання напруги під

навантаженням, по ступенях, для силових трансформаторів потужністю від 6 до 40 МВА.

Пристрої РПН розраховані для роботи в трансформаторному маслі при температурі масла від 100°C до мінус 25°C, а також до мінус 60°C без виконання перемикачів. Температура навколишнього повітря від 40°C до мінус 60°C (кліматичне виконання У1 та ХЛ1). Пристрій показано на рисунку 7.

У комплекті з пристроями РПН постачаються: - блок автоматичного регулювання (регулятор напруги), що забезпечує видачу команди на вмикання пристрою РПН. Регулятор напруги працює в автоматичному режимі при зміні напруги на затискачах трансформатора; - захисне реле: видає сигнал на вимкнення трансформатора у разі неправильної роботи контактора ПУ; - датчик-реле температури перериває ланцюг керування РПН при температурі масла нижче мінус 25°C. Пристрої допускають дистанційне керування та ручне керування від рукояті під час налагодження або випробування трансформатора.



Рисунок 7 – Пристрій РПН типу РНТА

Перш ніж розпочинати експлуатацію перемикального пристрою, необхідно провести його налаштування та налагодження. Завдяки правильному налаштуванню та налагодженню перемикального пристрою, пристрій працюватиме вірно з подальшим використанням, без небажаних проблем і дефектів.

Крім цього, користувач може зробити перевірку правильності роботи тонкого перемикання положень за допомогою кутової діаграми, яку можна зняти приблизно таким самим методом, як і часову, користуючись заводськими рекомендаціями. Фіксація кута повороту виконується згідно з коливанням стрілки вимірювального приладу, а також у разі спрацювання відмітника, який є по суті стрілкою індикаторного приладу [10]. Відлік кутів здійснюється за допомогою шкали нерухомого лімба відносно стрілки, закріпленої на валу ротора.

Перемикання пристрою РПН з відгалуження на відгалуження відбувається зі швидкістю переміщення контактів 0,5 м/с, при дотриманні певної послідовності роботи контактів, що забезпечує безперервність кола навантаження трансформатора в процесі перемикання. Під час перемикання пристрою з «1» положення в «9» положення, перемикаються тільки контакти, що знаходяться в перемикачі навантаження, за допомогою переведення навантаження з одного відгалуження на інше. Під час перемикання пристрою з «9» положення в «10» положення вже відбувається замикання контакту нейтралі. «10» положення є першим проміжним положенням перемикального пристрою.

Схема принципова зображена на рисунку 8.

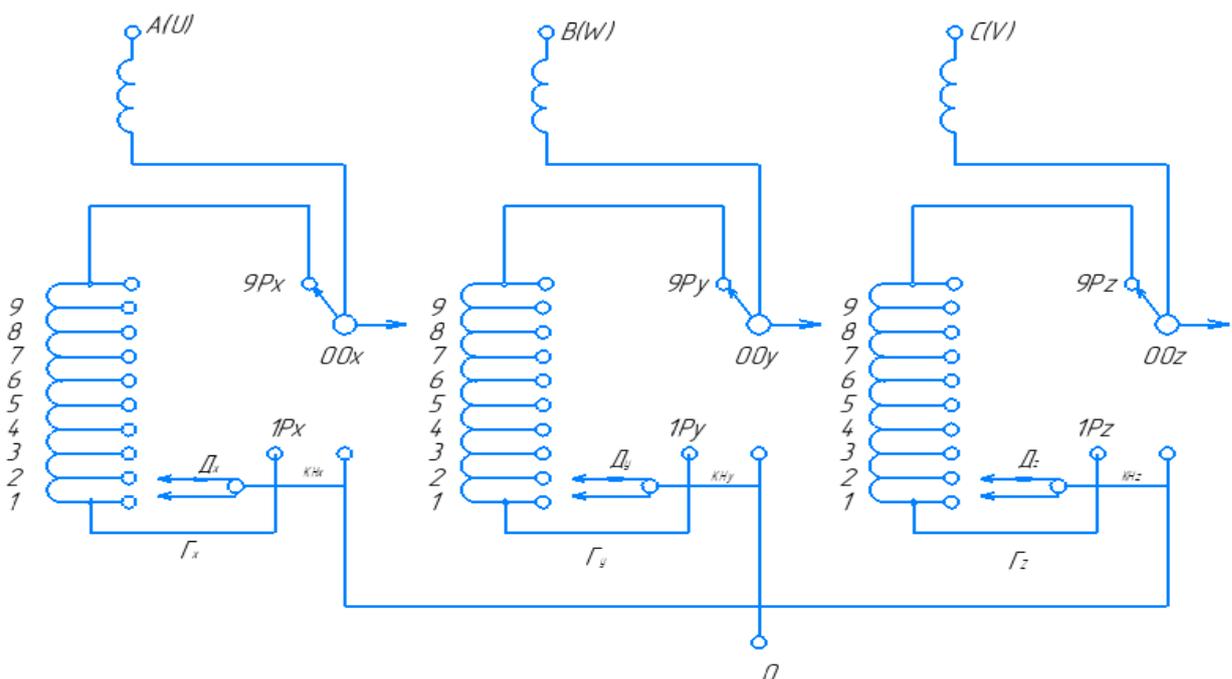


Рисунок 8 – Схема принципу дії РНТА

Для здійснення перемикачів пристрою РПН на один ступінь під час увімкнення електродвигуна, рух передається через зубчасті циліндричні пари (із загальним передавальним відношенням), муфту вільного ходу та нижній повідець, а далі на повідець із мальтійською передачею. Рухомі контакти перемикача навантаження, безпосередньо пов'язані з мальтійською шестернею, переміщуються з одного нерухомого контакту на інший і фіксуються мальтійською шестернею в новому положенні. До мальтійської шестерні прикріплена зубчаста шестерня, яка приводить в рух покажчик положення перемикача навантаження та преселектор.

Рухома система перемикача навантаження передає рух через муфту та циліндричну зубчасту передачу повідцям мальтійського механізму перемикача. Далі повідець, повертаючись при кожному перемикачів пристрою РПН на певний кут, входить в зачеплення з шестернею мальтійського механізму при перемикачів пристрою з положення «7» в положення «8», а виходить із зачеплення при перемикачів з положення «15» в положення «16».

Для можливості перемикачів пристрою РПН вручну (під час пусконаладжувальних робіт) до шестерні може бути під'єднаний ручний привід. Ручний привід, при встановленні в робоче положення, впливає (через систему важелів) на кінцевий вимикач, розриваючи при цьому ланцюг живлення електродвигуна.

Пристрій РПН за своєю конструкцією є заглибним, оскільки його основна функціональна складальна одиниця – механізм перемикачів – вбудовується в бак трансформатора. Поза баком знаходиться несучий фланець та механізм управління, а також окремо встановлюваний на баку трансформатора ШУ (шафа управління). Механізм перемикачів складається з перемикача навантаження, кожуха, механізму управління та кришки. Сам же перемикач складається з контактної барабана, групи контактів та кришки.

Барабан контактний складається з ізоляційного циліндра, корпусу та фланця. На внутрішній поверхні ізоляційного циліндра закріплені нерухомі

контакти – мідні пластини з зовнішніми виводами, до яких під'єднуються відведення регулювальної обмотки трансформатора. Контакти розташовані трьома групами, розділеними по висоті циліндра. Кожна контактна група складається з дев'яти контактів, причому контакти 1–9 рівномірно розташовані по дузі й віддалені один від одного на ізоляційну відстань ступені, а відстань між контактами 1 і 9 кратна ізоляційній відстані ступені.

Місця з'єднання ізоляційного циліндра з корпусом контактів ущільнені гумовими прокладками, що забезпечують надійне відділення масла, яке знаходиться в барабані контактному та забруднене продуктами горіння дуги, від масла трансформатора. У корпусі є посадкові місця для кріплення контактної групи та кришки. На кришці розташовані патрубки для підключення струменевого реле і захисної мембрани, посадкове місце для встановлення реле температури, пробка для випуску повітря, вікно показчика положення. Через кришку також виведена трубка для зливу масла, що закінчується патрубком, та привідний вал перемикача навантаження. Контактна група складається з ізоляційного циліндра з прикріпленими до нього рухомими контактами блока резисторів, фланців, мальтійського колеса, тяги і показчика положень [7].

Рухомі контакти – це три групи роликів контактів, розташованих по висоті циліндра та розвернутих один відносно одного під кутом 120 градусів. Кожна контактна група складається з двох контактів: головного та дугогасильного. Дугогасильний контакт розташований нижче головного контакту по висоті циліндра та розвернутий відносно нього під кутом 17 градусів.

Кожен рухомий контакт складається з двох роликів, закріплених за допомогою осі до корпусу. Останній кріпиться до циліндра болтами за допомогою пластини. Контактний натиск між роликами та струмопровідним корпусом створюється пружиною, а між роликами та нерухомим контактом – пружинами. З метою зменшення абразивного зносу контактної поверхні, між роликом та корпусом встановлена шайба з кадмієвої міді. Всередині циліндра розміщується блок резисторів. Він являє собою набір з трьох резисторів, кожен підключається на фазу. Резистори збираються на шпильках, які кріпляться до

фланця. Струмообмежувальний резистор кожної фази складається з дроту з високим омичним опором, намотаного на каркас, що складається з двох фланців зі шпильками та з поперечними пазами для фіксації дроту. Початок та кінець резистора виведені із закріплених на фланцях.

Відповідно до схеми регулювання, головний рухомий контакт кожної фази через струмопровідний корпус з'єднаний гнучким зв'язком з вхідним кінцем струмообмежувального резистора і одночасно зі струмопровідною шиною. Електричний зв'язок між шинами здійснюється через фланець і латунне кільце. Подальше виведення нейтралі здійснюється за допомогою двох контактів на фланець.

Рухомий дугогасильний контакт кожної фази з'єднується гнучким зв'язком з виводами кінців струмообмежувального резистора відповідної фази. Поворот циліндра з рухомими контактами на кут, що відповідає переміщенню з одного нерухомого контакту на інший, здійснюється мальтійською шестернею, яка кріпиться через втулку за допомогою шліцевого з'єднання. Мальтійська шестерня приводиться в рух повідцем, вал якого пов'язаний через муфту вільного ходу з механізмом управління. На валу мальтійської шестерні вільно сидить пластина, що є механічним упором, який запобігає перемиканню пристрою РПН за кінцеві положення. Конструкція рухомих і нерухомих контактів перемикача попереднього вибору аналогічна конструкції контактів перемикача навантаження. Нерухомі посріблені контакти закріплені на ізоляційному циліндрі. До складу механізму перемикання входять елементи силового ланцюга, а також елементи управління та сигналізації, змонтовані на плиті. У кришці є вікно, в якому видно цифру, що вказує номер положення РПН, а також встановлена заводська табличка, що містить технічні характеристики пристрою РПН. Середовище механізму управління – повітряне. Місця з'єднання механізму з кожухом і кришкою ущільнені прокладками для виключення можливості потрапляння вологи і пилу в порожнину механізму управління.

Силовий ланцюг механізму керування складається з електродвигуна, зубчастої передачі, повідка взводу пружин і муфти вільного ходу. Повідок, муфта

та блок-шестерня жорстко встановлені на одновісних валах. Пружини шарнірно закріплені з одного боку на повідку, а з іншого – на стойці, жорстко прикріпленій до плити. На блок-шестерні встановлено палець для повороту мальтійської шестерні за одне перемикавання пристрою РПН на кут  $72^\circ$  [7].

Ланцюг керування та сигналізації складається з зубчастої передачі, що складається з шестерні, цівкової передачі, датчика положення, шляхових вимикачів, важелів керування, шляхового вимикача, повідка, а також панелі зі швидко знімним роз'ємом. Далі розглянемо рішення щодо застосування РПН, як засіб забезпечення надійності та діагностики.

### **1.5 Використання систем моніторингу СМТ-РПН, TDM для підвищення надійності та контролю**

Оскільки основні поломки трапляються саме в перемикаючих пристроях, необхідно використовувати системи моніторингу РПН, які допомагають застерегти РПН від поломок та вчасно відреагувати на дефекти. Йдеться про системи моніторингу РПН. Ми розглянемо 2 варіанти системи (СМТ-РПН та TDM). Застосування системи моніторингу TDM реалізує в собі:

1. Інформацію про поточне положення перемикавання.
2. Вимірювання температури контактора та масла.
3. Момент перемикавання на наступне положення.

Під час перемикавання відгалуження система моніторингу починає зчитувати дані по каналах напруги, струму та вібрації. Реєстрація даних закінчується після завершення часу перемикавання. Далі, на основі отриманих даних, математичним шляхом обчислюється сигнал потужності. Після цього відбувається обробка даних, які зберігаються в пам'яті системи:

1. Час перемикавання.
2. Середньоквадратичне значення напруги, струму та вібраційного прискорення.
3. Середня активна потужність.

#### 4. Коефіцієнти вібрації РПН.

Процес вимірювання акустичних сигналів запускається після перемикання положення в ПБП, або, залежно від налаштувань системи, оскільки моніторинг може проводитися за розкладом та часом. Якщо в отриманій вибірці даних недостатньо періодів, то модуль обробляє дані та проводить наступне вимірювання, щоб набрати необхідну кількість даних у пам'ять [9].

Більш доцільно використовувати систему моніторингу СМТ-РПН від АС-ТРАНСФО.

При початку роботи необхідно дотримуватися заходів безпеки та нормативних документів. Якщо пристрій перебуває під напругою, то проведення робіт не допускається. У плані конструкції СМТ-РПН являє собою навісну шафу, зроблену з листової сталі з покриттям або з нержавіючої сталі.

Система моніторингу працює при температурі від мінус 60 до плюс 45 °С та при вологості повітря до 100% і атмосферному тиску до 100 кПа. СМТ-РПН споживає малу потужність, тому теплові впливи відбуваються за рахунок конвекції. Для підтримання температурних режимів встановлено термостати. Підключення та монтаж кабелів здійснюється через дно шафи, на якому встановлені кабельні вводи. «Для живлення та сигнальних ланцюгів встановлені спеціальні вводи з різним діаметром під металорукав та кабель» [9].

Завдяки системам моніторингу можна здійснити:

1. Безперервний контроль технічних характеристик РПН (механічного та комутаційного ресурсу контактора РПН).
2. Контроль ресурсу заміни оливи, механічного моменту на валу приводу РПН, часу та максимального моменту на валу РПН при останньому перемиканні і т.п.) в процесі експлуатації із записом в енергонезалежну пам'ять.
3. Можливість блокування моторного приводу при перевищенні граничних значень контрольованих параметрів.
4. Захист від пошкодження пристрою РПН та трансформатора.
5. Контроль часу чергового технічного обслуговування (для своєчасного

планування).

6. Сигналізація про наближення терміну чергового ТО – після кожного перемикання система моніторингу зберігає в енергонезалежну пам'ять дані про перемикання (час, початкове/кінцеве положення, всі значення параметрів, моменти на валу приводу по зонах перемикання і інше.).

7. Формування релейної попереджувальної сигналізації про стан РПН.

8. Передача даних в суміжні системи або мережу замовника за стандартними цифровими протоколами.

9. Світлова індикація поточного стану РПН. Єдина проблема — це вартість даних систем, досить висока, але при їх застосуванні знижуються ризики поломки РПН, (які можуть принести більші фінансові втрати).

Єдина проблема — це вартість цих систем, вони доволі дорогі, але їх застосування знижує ризики поломки РПН (які можуть призвести до більших фінансових втрат). Система моніторингу РПН у стандартній комплектації має цифровий інтерфейс Ethernet TX/FX (протокол Modbus). За вимогою замовника можлива реалізація будь-яких інших інтерфейсів (RS485, RS232 і інші.) та протоколів передачі даних (МЕК60870-5-104, МЕК 61850 і інші.). У стандартному виконанні система має шість вихідних релейних сигналів, призначених для сигналізації стану як самого пристрою РПН, так і системи моніторингу, блокування роботи приводу, а також розмноження сигналів для контролю в інших системах.

Інформація із системи моніторингу РПН може передаватися на ПЕВМ оператора, до СМіД, систем АСУ ТП. Передбачено формування аналітичних звітів для фахівців експлуатуючих організацій.

Система моніторингу РПН побудована на базі промислового мікропроцесорного контролера з енергонезалежною пам'яттю, у якій зберігаються програмне забезпечення та налаштування, що не потребують повторного завантаження після відключення живлення зі шафи моніторингу РПН.

Вся випущена продукція проходить процедури контролю якості в процесі виготовлення, 100% налагодження та випробування після виготовлення, що скорочує строки впровадження продукції на об'єктах Замовника. Відділ сервісу та технічної підтримки ЗАТ «Інтера» оперативно здійснює гарантійне обслуговування поставленої продукції у режимі on-line консультацій та з виїздом на об'єкт у разі необхідності. Здійснюється післягарантійне супроводження продукції: регулярне технічне обслуговування, перенавчання персоналу та продовження гарантійного строку експлуатації.

### **Висновок по першому розділу**

1. Під час розгляду вимог і обґрунтування застосування РПН встановлено, що комутаційні пристрої під навантаженням можуть здійснювати перемикання положень регулювання автоматично за допомогою регулятора напруги або дистанційно за допомогою шафи управління чи моторного привода.

Оскільки навантаження споживачів постійно зростають і змінюються, необхідно регулювати напругу. Застосування ПБВ можливе лише за відключеному трансформаторі, що може призвести до певних проблем у виробництві та у споживачів. Застосування РПН дозволяє регулювати напругу та навантаження без відключення від мережі. Перемикання РПН передбачено за допомогою кнопок у шафі управління (місцеве керування) або автоматично. Час перемикання положень РПН триває протягом 5-10 секунд.

2. Під час розгляду типів комутаційних пристроїв РПН від різних виробників були визначені переваги та недоліки того чи іншого виробника. РПН марки MR (Maschinenfabrik Reinhausen) відрізняються високою якістю комплектуючих, виконанням та конструкцією.

Але з фінансового боку – це дорогий вимикач, проте обслуговування та ревизія не становлять проблем, оскільки не потрібно розгерметизувати трансформатор.

У цих вимикачах використовується подвійний контактор «вакуум/олія». Це також є кроком до підвищення надійності та зменшення витрати матеріалів.

Резервні масляні дугогасильні контакти можуть здійснити до 2000 переключень після завершення терміну служби вакуумної камери, що дає змогу підготуватися до ремонту без виведення трансформатора з експлуатації.

3. Для підвищення надійності та збільшення ймовірності відмов РПН необхідно використовувати системи моніторингу та контролю. Було розглянуто дві системи моніторингу, їхню роботу та переваги.

З метою більшого забезпечення надійності необхідно застосовувати систему моніторингу СМТ-РПН.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТИКИ ТА РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

За статистикою близько 40% поломок або аварій силових трансформаторів трапляються у зв'язку з пошкодженнями РПН. Оскільки в більшості трансформаторів було реалізовано можливість регулювання напруги під навантаженням, підстанції та експлуатуючі організації не так часто вдавалися до використання цих пристроїв і зазвичай застосовували їх у штатних та оперативних режимах [10]. Щоб виконати переключення під час пікових навантажень (зазвичай це кінець сезону), трансформатори виводили з роботи енергосистем, після чого за допомогою РПН або ПБВ виконували переключення, але оскільки при виведенні трансформаторів з роботи споживач може залишитися без електроенергії, від цієї ідеї відмовилися. Окрім цього, через те, що пристрої переключення не є найнадійнішими, мають ряд недоліків та неможливість провести діагностику через відсутність необхідних установок, а також досить складні вимірювання параметрів, було прийнято рішення використовувати РПН на основі цих пристроїв, що представляють собою циліндричний бак із системою нерухомих контактів, вибірника положень та системою рухомих контактів.

З появою нових вимог до показників якості електроенергії, а саме до вимог щодо перетвореної напруги, підстанції та організації стали значно більше використовувати ПБЗ (пристрої регулювання під навантаженням). Завдяки цьому з'явився попит і пропозиції на відповідні товари та установки (системи діагностики, покажчики положення, регулятори напруги тощо), а також прилади для контролю ПБЗ.

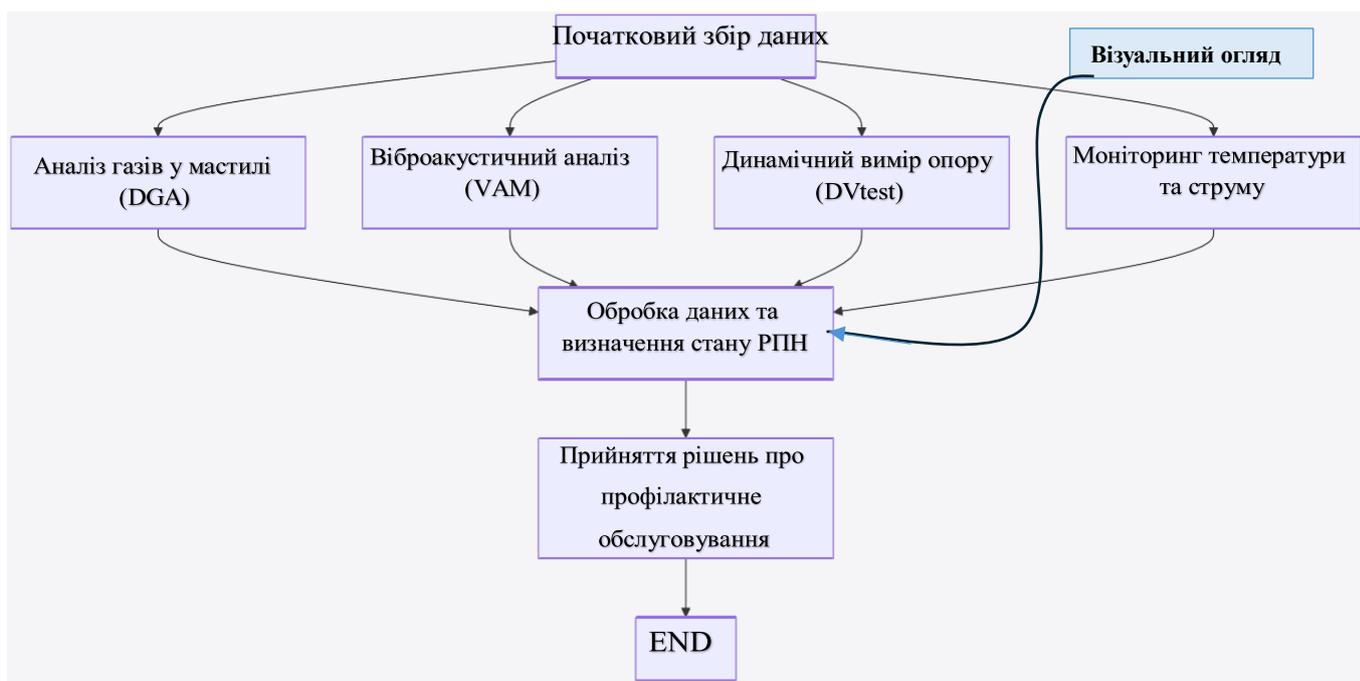
Проведення ремонту на трансформаторному обладнанні без належного огляду та перевірки стану перемикаючих пристроїв, а також без використання програм та інструкцій з експлуатації, може призвести до значних фінансових втрат і зниження надійності трансформатора в цілому. Прикладом можуть

служувати раніше широко застосовувані та вироблені ПБЗ типу RS-3 і RS-4 болгарського виробництва компанії Hyundai, оскільки основні причини – це конструктивні поломки та пошкодження (наприклад, відшарування гетинаксу, з якого зроблені стійки вибірника). За типом несправності, зазвичай найчастіше виходить з ладу контактор і механізм перемикавання, рідше – вибірник положення і преселектор.

Дуже часто спостерігаються дефекти контактора, окислення контактів, відкручування кріпильних виробів, що призводить до значного підгоряння контактів і роз регулювання елементів кінематики; трапляється вихід з ладу струмообмежувальних резисторів [10]. Крім перелічених найбільш частих пошкоджень, в пристроях РПН типів RS-3 і RS-4 зустрічаються й інші недоліки: негерметичність між баком трансформатора і баком контактора (при встановленні монтажних фланців безпосередньо в бак РПН можливі зазори), затримка перемикавання через старіння металу, поява іржі на тарілчастій перемикальній пружині, пошкодження захисної мембрани, пошкодження ізоляційного валу вибірника, розбалансування кінематики контактора.

## 2.1 Методи діагностування РПН

Схематична діаграма взаємозв'язків основних методів моніторингу РПН:



Діаграма 1: Схематичне представлення процесу діагностики стану РПН.

1) Візуальний огляд – найпростіший метод діагностики, достатньо простий у використанні, потребує досить досвідченого ока для оцінки пошкодження. Проте цей метод має такі недоліки, як, на жаль, можливість перевірити лише більш доступні для огляду вузли комутаційного пристрою та моторного приводу. Зазвичай час оглядів визначається за кількістю перемикань, які виконав РПН, або під час проведення планової ревізії відповідно до керівництв з експлуатації. Оскільки не всі частини можна оглянути, такі як стан контактів селектора, (для цього необхідно виконати повний демонтаж РПН, злити масло та очистити систему контактів, що є досить трудомістким процесом), цей метод не можна застосовувати для повної діагностики РПН.

2) Метод аналізу газового складу – оскільки газоаналізатори та хроматографи загалом чутливі до пошкоджень у роботі контактора та його перегріву, цей метод досить широко застосовується. Даний метод дуже поширений для визначення електричної дуги при роботі РПН. Найбільш поширеними газами для вимірювання є водень, метан, етан, чадний газ, вуглекислий газ, метан [1]. Для вимірювання суми газів та концентрації газу загалом застосовуються газоаналізатори (Hydran, Hydrocal, ІнтеГаз тощо). Ці аналізатори встановлюються на бак трансформатора або на виносні стійки, після чого відбувається підключення до шафи управління. Визначення несправностей у комутаційному пристрої, відповідно до «ІЕС 60599», здійснюється за допомогою вимірювання величини відношення етану до водню: якщо в основному баку концентрація газів переважає більш ніж у 2-3 рази, то масло, ймовірно, забруднене відходами роботи контактора РПН. Після цього проводиться порівняння концентрації газів в основному баку та в баку РПН [1]. Концентрація етану залежить від кількості перемикань РПН, оскільки цей газ потрапляє в основний бак трансформатора. Однією з головних процедур при прийманні, ремонті або ревізії РПН є зняття кругової діаграми. Осцилографування процесу перемикання дає змогу визначити, чи є затягування спрацьовування перемикання на ступені, співпадіння за фазами та кратність спрацьовування контактора.

3) Метод вимірювання вібрації – оскільки трансформатор зазвичай працює в вібраційних умовах, ці вібрації можна використовувати як основу для методу вібродіагностики. Цей метод може допомогти виявити пошкодження та несправності, не виводячи трансформатор з роботи для ремонту; за допомогою цього методу можна виявити дефекти, пов'язані зі ослабленням кріпильних з'єднань металоконструкцій, що дозволяє усунути та запобігти недолікам до аварії. Основними недоліками методу є вимоги до знань і відповідальності персоналу, а також наявність широкої бази знань про РПН загалом і про конкретний тип перемикаючого пристрою. Найпростішим методом вимірювання вібрації є СКЗ по поверхні стінок і кришки бака. «Після проведення цих випробувань створюються графіки вібрації по всьому баку трансформатора, за якими визначають найбільш схильні до поломок вузли» [12].

4) Метод температурних вимірювань – температура різних частин трансформатора найчастіше є першим ознакою підвищеного опору контактів. Ці вимірювання проводяться під час штатної роботи трансформатора. Основним недоліком є неможливість визначити стан контактів, на яких немає навантаження. Для контролю температури зазвичай застосовують термоопір Pt100. Платиновий термоопір Pt100 є досить поширеним елементом, оскільки він має дуже хороше співвідношення якості та ціни. Його можна використовувати як окремий прилад для вимірювань. Проте найчастіше цей прилад встановлюється для контролю температури РПН, причому він встановлюється на монтажному фланці пристрою. Головне при цьому – правильно врахувати приєднувальні розміри датчика, щоб уникнути зазорів і негерметичності. «У такому разі вдасться забезпечити найкращі умови для аналізу температури середовища. В основі лежать елементи з платини, опір якої при 0 градусах становить 100 Ом. Варто зазначити, що платина має позитивний коефіцієнт, що означає збільшення опору при зростанні температури. У деяких приладах у одному корпусі може бути розміщено одразу три термоелементи. Залежно від різновиду вимірювального кола застосовується відповідний різний спосіб підключення.

5) Метод вимірювання електричного опору контактів. За цим методом діагностують стан контактів вибірників, передвибірників та контактора. Вимірювання повинні відбуватися для всіх ступенів регулювання РПН. Вимірювання виконуються без демонтажу РПН, а також у штатному режимі. Зазвичай для даного методу застосовують омметр, за допомогою якого вимірюють опір кожного контакту (рухомого чи нерухомого), у разі відхилень контакти необхідно прочистити від окислення тощо.

Вимірювання опору струмообмежувального резистора проводити під час збирання резистора та контактної групи методом одинарного моста. Далі після збирання групи проводять вимірювання між корпусами головного та дугогасного контактів кожної фази. Вимірні значення не повинно суперечити паспортним даним [12].

Щоб виміряти опір струмопровідного контуру на всіх положеннях, необхідно перед даною процедурою провести не менше двох циклів перемикачів. Вимірювання проводиться при струмі не менше 50 А, не більше номінального, також контакти повинні бути змащені маслом або занурені в нього.

б) Зняття кругової діаграми – кругова діаграма характеризує контакти селектора та преселектора їх положення і стан. Вимірювання потрібно виконати виходячи з усіх положень контактора та преселектора. Зняття кутової діаграми слід проводити для кожної фази при перемикачній пристрою РПН з 1-го в 10-те положення і назад вручну за допомогою технологічного ручного приводу. Відлік кутів потрібно проводити за шкалою покажчика механізму управління. Встановлення початкового положення (зазвичай це 0 градусів) проводиться суміщенням рисок, що є на валу та кришці, кутова діаграма повинна відповідати діаграмі, яку можна зняти за схемою на рисунку 9 та вказаній в керівництві з експлуатації на перемикаючій пристрій.

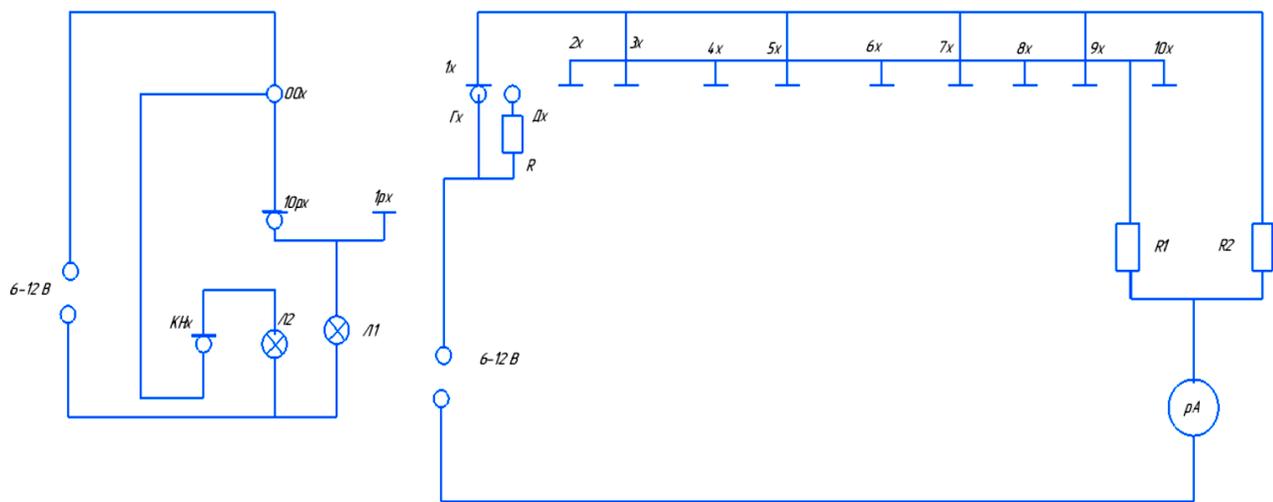


Рисунок 9 – Електрична схема зняття кругової діаграми

7) Тимчасова діаграма перемикача навантаження. За отриманими осцилограмами перевіряють: 1. Відсутність розривів електричного кола. 2. Тривалість роботи дугогасних контактів у положенні «міст». 3. Тривалість перемикачання між моментами розмикання та замикання допоміжних і дугогасних контактів різних плечей. 4. Відсутність неприпустимих вібрацій рухомих дугогасних контактів контактора, в момент, коли відбувається гасіння електричної дуги. Зняття кругової діаграми слід проводити на всіх положеннях перемикача. Кругова діаграма не повинна відрізнятися від знятої на заводі-виробнику. Перевірку спрацювання перемикаючого пристрою і тиску контактів слід проводити згідно із заводськими інструкціями. Схема зняття тимчасової діаграми наведена на рисунку 10.

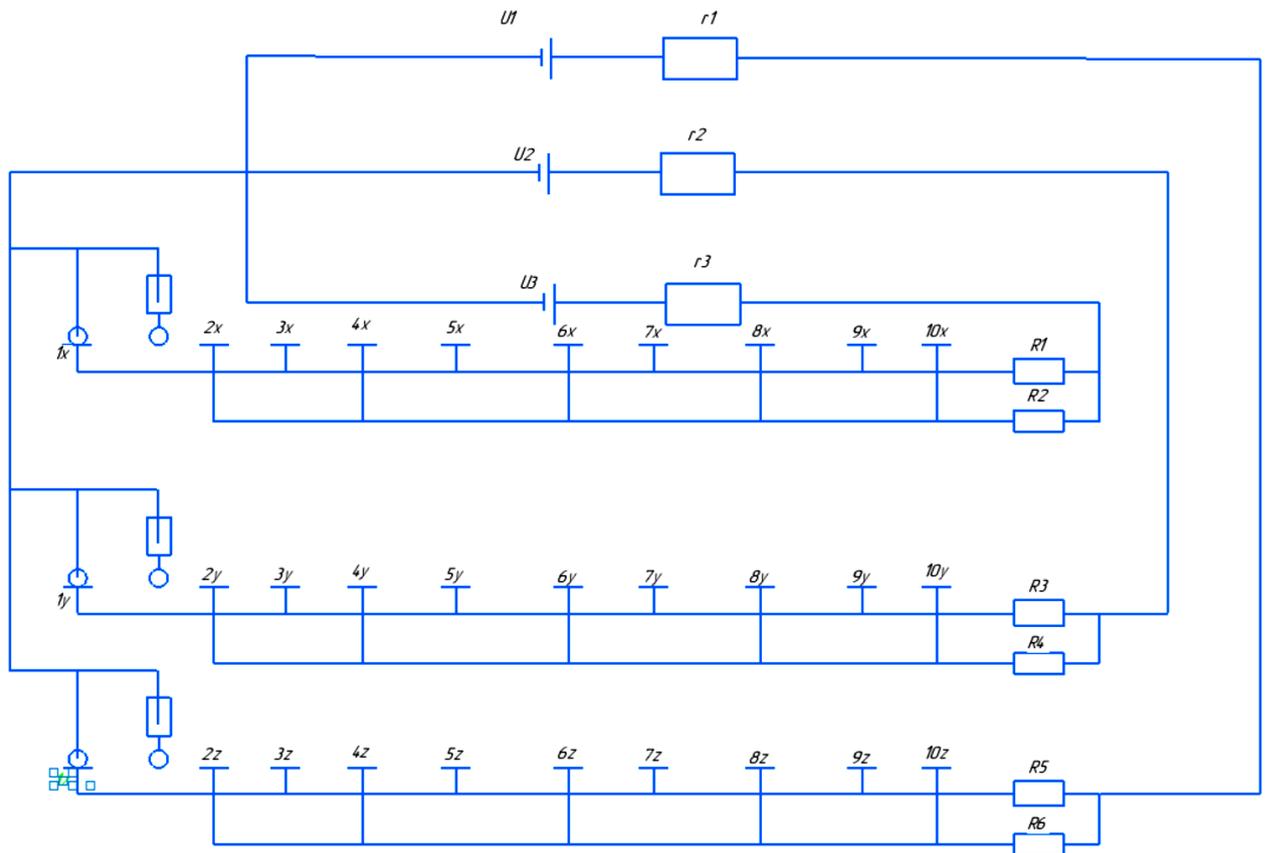


Рисунок 10 – Схема зняття часової діаграми

Перевірка залежного моменту дії контактів перемикача навантаження від часу перемикання здійснюється шляхом зняття часової діаграми після проведення випробувань трансформатора. Зняття даної діаграми слід проводити методом осцилографування на всіх фіксованих положеннях пристрою РПН в обох напрямках при температурі масла від плюс 10 до плюс 40 градусів за Цельсієм. Вібрація контактів при перемиканні на одне положення не повинна перевищувати 2 мс на кожній з ділянок фаз. Але допускаються розриви контактів при перемиканні тривалістю не більше 0,5 мс. Неоднорідність замикання та розмикання контактів різних фаз не контролюється.

8) Прогін механізмів пристрою РПН. Для прогону РПН пристрій повинен бути на четвертій позиції, контакти замкнуті на 4-ій позиції (замкнутий стан контактів визначається перевіркою наявності електричного кола між контактами та нейтраллю), у вікні покажчика положень знаходиться положення «4» (середнє). Далі потрібно подати живлення 220 В при підключенні двигунів

за схемою трикутник. Також необхідно перевірити правильність фазування електродвигуна, для чого провести перемикання за допомогою вимикачів місцевого керування на одне положення в сторону n-положення. Пройти весь діапазон регулювання в покроковому режимі за допомогою кнопок регулювання в покроковому режимі.

## **2.2 Пропозиції щодо підвищення надійності пристроїв регулювання напруги**

Зміцнення надійності пристроїв регулювання напруги (РПН) виступає однією з провідних цілей сучасної енергетики. Впровадження ефективних стратегій на етапах проектування, експлуатації та моніторингу зменшує ймовірність відмов і підвищує загальну ефективність системи.

Одне з сучасних рішень — застосування вакуумних технологій для розриву дуги під час перемикання. Вакуумні контакти забезпечують надійну аркозагасну дію, що зменшує генерацію газів та запобігає електродинамічним несправностям. Такий підхід підвищує стійкість регулювальних пристроїв до різких змін навантаження та знижує ймовірність пробоїв.

Іншим суттєвим напрямком є впровадження комбінованих методів регулювання напруги, які поєднують ступінчасте та плавне керування. Такий підхід дозволяє зменшити кількість механічних перемикань, що прямо впливає на знос контактів та інших рухомих частин регуляторних пристроїв РПН. Використання таких технологій забезпечує баланс між високою точністю регулювання та тривалим експлуатаційним ресурсом пристроїв.

Перехід від традиційного графічного обслуговування до прогнозного технічного обслуговування (СВМ — condition-based maintenance) є важливим кроком для підвищення надійності трансформаторів. Моніторинг у реальному часі за допомогою систем на кшталт DynamicMetrix® дозволяє оперативно виявляти відхилення від нормальних робочих умов і здійснювати профілактичні заходи до виникнення серйозних несправностей.

Оскільки основні поломки відбуваються в контактах, необхідно перевіряти їх як до введення в експлуатацію трансформатора, так і під час експлуатації. Досить часто достовірна інформація щодо вимірюваного опору невідома, тому рішенням для підвищення надійності буде оцінка критеріїв справності контактів для перевірки. Також потрібно враховувати опір проводів і кабелів, що входять у вимірювальний ланцюг, який з'єднує контактор з трансформаторною обмоткою та перемикач. Також розміри та довжини проводів і кабелів різні [12]. Отже, з цієї причини проводити порівняння опору між фазами проблематично і неправильно. Але, як впливає з практики, одночасна відмова одразу двох рухомих контактів (парного та непарного) не є частим явищем, для того, щоб запобігти даній поломці, необхідно окремо порівнювати опір парних та непарних контактів перемикаючого пристрою.

Зазвичай вимірюють опір струмоведучого контуру попереднього вибору на 10 та 13 положеннях перемикаючого пристрою, між виводами основної обмотки та першим десятим нерухомим контактом реверсу попереднього вибору (норма опору не більше 1000 мкОм).

Також використовують вимірювання опору струмоведучого контуру попереднього вибору на 13 та 12 положеннях перемикаючого пристрою між вводом нейтралі (при переключенні в протилежну сторону). Норма опору при такому вимірюванні не більше 2000 мкОм.

Крім цього, необхідно провести вимірювання опору на всіх фазах перемикального пристрою на 10-й та 13-й позиціях (норма опору також не повинна перевищувати значення 2000 мкОм).

Даний спосіб вимірювання опору є амперметр-вольтметром, але оскільки цей метод трудомісткий та дорогий, частіше використовують омметр. Перевірка контактів забезпечує більш детальну інформацію про сам РПН, а також зменшує ймовірність відмов трансформаторів. Перевагами є точна інформація про опір контактів, що дає можливість оцінити працездатність РПН. Мінусами даного рішення під час експлуатації є відключення трансформатора від мережі, але слід проводити ці вимірювання після закінчення заявленого терміну

перемикання, також потрібно буде проводити ревізію перемикального пристрою. Після того, як будуть виконані дані дії, надійність РПН підвищиться і зменшиться ймовірність відмов.

### **Висновки по другому розділу**

Під час дослідження та розгляду методів діагностики розглядалися заходи з двох точок зору: економічної та технічної. З економічної точки зору слід обирати заходи та закупівлю обладнання, виходячи з можливостей споживача, об'єкта або виробництва, де застосовується трансформатор. Найпоширенішими методами є візуальний огляд, а також методи зняття діаграм і вібродіагностики, оскільки вони вимагають мінімум персоналу та обладнання. Це також більш вигідно з фінансової точки зору, оскільки витрати не є колосальними.

1. Якщо розглядати інші методи, наприклад, метод вимірювання температури із застосуванням можливих індикаторів, то це вже більш надійно з технічної точки зору, але одночасно виникають складнощі з налаштуванням термометрів або терморезисторів. Водночас з економічної точки зору індикатори від зарубіжних виробників є дорогими, і у разі поломки їх заміна буде трудомісткою.

2. Розглянутий метод діагностування та перевірки контактора за допомогою пробного перемикання, перевірки роботи схеми і контактора є найкращим. Загалом при експлуатації трансформаторів для уникнення поломок і аварій необхідно діагностувати РПН, оскільки більшість випадків відмов відбуваються саме у пристрої перемикання.

3. Для підвищення надійності РПН та збільшення строку його експлуатації слід застосовувати вимірювання опору струмоведучого контуру преселектора. При знаходженні РПН на 13 і 12 положеннях між вводом нейтралі (під час перемикання в протилежний бік) вимірювання опору проводиться за допомогою омметра. Нормою опору при вимірюванні є не більше 2000 мкОм.

## РОЗДІЛ 3

### ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВИБОРУ РПН ДЛЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

#### 3.1. Необхідність вибору РПН для силових трансформаторів

Оскільки трансформатор є досить дорогим обладнанням, вибір комплектуючих для нього повинен здійснюватися з великою відповідальністю. Основним завданням є правильний вибір перемикаючого пристрою для трансформатора.

Перемикаючі пристрої (ПУ) виготовляються за двома типами виконання несучих монтажних фланців для встановлення в бак трансформатора (круглий і монтажний фланець дзвоноподібного типу) [13].

ПУ розроблено за принципом роздільної комутації, тобто процес за часом і місцем відокремлений від процесу переключення під навантаженням. Бажане положення обирається селектором без струмового вибору. Кожна фаза має по два ряди нерухомих контактів.

Непарні відгалуження підключаються до одного ряду. На кожному ряді нерухомих контактів працює лише один рухомий контакт. Відгалуження, де розташовані парні і непарні контакти, здійснюють почергові кругові рухи, при цьому непарні контакти вільні і можуть без струму вибирати положення регулювання, у той час як через парні контакти протікає струм.

У момент, коли непарні контакти є провідними струму, вибір положення може бути здійснений парними контактами також без струму. Відмова комплектуючих у трансформаторах такі [14]:

- Ввідні пристрої: 30,4%;
- Перемикаючі пристрої: 28,8%;
- Обмотки: 18,4%;
- Баки: 8,8%;
- Відводи: 7,2%;
- Ізоляція: 5,6%;

— Магнітопроводи: 0,8%.

### 3.2. Розрахунок та вибір РПН для трансформатора

Паспортні дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Паспортні дані ТРДЦН 80000[15]

Вид продукції, позначення нормативного документа	Номинальна потужність, кВА	Номинальна напруга обмотки			Спосіб з'єднання обмоток	Втрати кВт		Напруга короткого замикання			Струм XX
		В	С	Н		Х	КЗ	ВН	ВН	СН	
ТРДЦН-80000/220	80000	В	С	Н	Y11/Y11/D-0-11	Х	КЗ	ВН	ВН	СН	0,23
		Н	Н	Н		Х		-	-	-	
		220	115	35		40	310	10,5	18	7	

Шукаємо коефіцієнти навантаження обмотки трансформатора.

$$k_{зл.} = \frac{S_{nc}}{S_{НОМТ}} = \frac{68800}{80000} = 0,86 \quad (1)$$

$$k_{з.с.} = \frac{S_{зав}}{S_{НОМТ}} = \frac{34400}{80000} = 0,43 \quad (2)$$

$$k_{з.н.} = \frac{S_{гор} + S_{ту}}{S_{НОМТ}} = \frac{34400}{80000} = 0,43 \quad (3)$$

Знайдемо втрати активної потужності.

$$P_{KB} = P_{KC} = P_{KH} = 0,5 \cdot \Delta P_{ВН-НН}, \quad (4)$$

$$P_{KB} = 0,5 \cdot 34,4 = 17,2 \text{ кВт} . \quad (5)$$

Знайдемо обмотувальну напругу в %

$$U_{KB} = 0,5 \cdot (U_{KBH-НН} + U_{KBH-СН} - U_{КСН-НН}) = 0,5 \cdot (18 + 10,5 - 7) = 21,5\%, \quad (6)$$

$$U_{KC} = 0,5 \cdot (U_{KBH-СН} + U_{КСН-НН} - U_{KBH-НН}) = 0,5 \cdot (10,5 + 7 - 18) = 0\%, \quad (7)$$

$$U_{KH} = 0,5 \cdot (U_{KBH-НН} + U_{КСН-НН} - U_{KBH-СН}) = 0,5 \cdot (18 + 7 - 10,5) = 7,25\%, \quad (8)$$

Далі шукаємо втрати на реактивну потужність:

$$\Theta_{\text{КВ}} = \frac{U_{\text{КВ}}(\%)}{100} \cdot 80 = \frac{21,5}{100} \cdot 80 = 17,2 \text{ кВар} \quad (9)$$

$$\Theta_{\text{КС}} = \frac{U_{\text{КС}}(\%)}{100} \cdot 80 = \frac{0}{100} \cdot 80 = 0 \text{ кВар} \quad (10)$$

$$\Theta_{\text{КН}} = \frac{U_{\text{КН}}(\%)}{100} \cdot 80 = \frac{7,25}{100} \cdot 80 = 5,8 \text{ кВар} \quad (11)$$

Розрахунок зведених втрат трансформатора в режимі холостого ходу

$$P_x^{\square} = \Delta P + K_u \cdot \Theta_x = 45 + 0,05 \cdot 20 = 465,8 \text{ кВт} \quad (12)$$

Шукаємо приведені втрати на КЗ відповідних обмоток триобмоткового трансформатора.

$$P_{\text{КВ}}^{\square} = P_{\text{КВ}} + K_u \cdot \Theta_{\text{КВ}} = 17,2 + 0,05 \cdot 17,2 = 18,06 \text{ кВт} \quad (13)$$

$$P_{\text{КС}}^{\square} = P_{\text{КС}} + K_u \cdot \Theta_{\text{КС}} = 17,2 + 0,05 \cdot 0 = 17,2 \text{ кВт} \quad (14)$$

$$P_{\text{КН}}^{\square} = P_{\text{КН}} + K_u \cdot \Theta_{\text{КН}} = 17,2 + 0,05 \cdot 5,8 = 17,49 \text{ кВт} \quad (15)$$

Розрахуємо зведені втрати потужності трансформатора.

$$P_T^{\square} = P_X^{\square} + k_{3.В}^2 \cdot P_{\text{КВ}}^{\square} + k_{3.С}^2 \cdot P_{\text{КС}}^{\square} + k_{3.Н}^2 \cdot P_{\text{КН}}^{\square} \quad (16)$$

$$P_T^{\square} = 46 + 0,86^2 \cdot 18,06 + 0,43^2 \cdot 17,2 + 0,43^2 \cdot 17,49 = 65,61 \text{ кВт} \quad (17)$$

Далі виконаємо розрахунок і вибір перемикального пристрою для трансформатора ТРДЦН-80000/220 [16].

Вихідні дані:

- 1) кількість фаз – 3-фазний.
- 2) з'єднання обмоток трансформатора.
  1. Зірка із серединою обмотки.
  2. Зірка на початку обмотки.

3. 3, 4 з'єднані в трикутник.

3) Номінальна потужність трансформатора  $P = 80$  МВА.

4) Потужність, що знижується з положення 20 (цей параметр визначається виходячи з розрахунку контролю витків обмотки).

5) Регульована напруга  $U = 230$  кВ.

6) Рівень регулювання  $\pm 12\%$ .

7) Кількість ступенів  $\pm 12$ .

Коефіцієнт трансформації дорівнює:

$$K_m = \frac{U_{cm}}{U_H} = \frac{3500}{80000} = 0,43 \quad (18)$$

Розраховується напруга ступеня регулювання (у кВ):

$$\Delta U_m = \frac{\Delta U_{cm}[\%]}{100} \cdot U_{\epsilon_{ном}} = \frac{12}{100} \cdot 220 = 26,4 \text{ кВ}. \quad (19)$$

Далі визначимо випробувальну напругу для обладнання, згідно з даними на перемикальні пристрої, вона становить 72,5 кВ. Оскільки компанія MR є лідером у **розробках** РПН, обираємо перемикальний пристрій типу VM III 350 Y – 72,5/C – 14,27W.

Параметри перемикального пристрою:

1. Кількість фаз – 3.
2. Максимальний робочий струм – 350 А.
3. Схема з'єднання обмоток – зірка.
4. Випробувальна напруга для обладнання – 72,5 кВ.

### Висновок по третьому розділу

Перемикальний пристрій типу VM III 350 Y – 72,5/C – 14,27W є високовольтним апаратом, призначеним для комутації електричних кіл в

електроенергетичних системах. Ідентифікатор пристрою розшифровується наступним чином: "VM" вказує на тип пристрою – вакуумний вимикач, що забезпечує високу комутаційну здатність та надійність. "III" позначає серію або покоління даного вимикача, вказуючи на можливі конструктивні та технологічні вдосконалення.

Число "350" відображає номінальний струм відключення в кА (кілоамперах), що характеризує здатність пристрою безпечно розривати ланцюг під час короткого замикання. "72,5" позначає номінальну напругу в кВ (кіловольтах), вказуючи на максимальну робочу напругу, при якій пристрій здатний функціонувати. "C" відноситься до кліматичного виконання вимикача, характеризуючи його стійкість до зовнішніх факторів навколишнього середовища. Нарешті, "14,27W" вказує на потужність втрат в ватах (W), що є важливим параметром для оцінки енергоефективності та теплового режиму роботи пристрою.

Таким чином, цей перемикальний пристрій є надійним вакуумним вимикачем, розрахованим на високі струми відключення та напруги, та придатним для використання в певних кліматичних умовах. Потужність втрат вказує на його енергоефективність. Точні характеристики, такі як робочий ресурс, механічні характеристики та відповідність стандартам, потребують додаткової інформації з технічної документації виробника.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Ефективна та надійна робота електричних мереж залежить від стабільності напруги, особливо в умовах змінних навантажень. Силові трансформатори, як ключові елементи цих мереж, піддаються значним коливанням вхідної напруги та навантаження, що неминуче впливає на рівень вихідної напруги. Саме тому, використання пристроїв регулювання напруги (ПРН) для силових трансформаторів є не просто бажаним, а необхідним для забезпечення стабільної та якісної електроенергії.

В першій главі розглянуто основні вимоги до роботи РПН і та встановлено, що комутаційні пристрої під навантаженням можуть здійснювати перемикання положень регулювання автоматично за допомогою регулятора напруги або дистанційно за допомогою шафи управління чи моторного привода. Оскільки навантаження споживачів постійно зростають і змінюються, необхідно регулювати напругу. Застосування ПБВ можливе лише за відключеному трансформаторі, що може призвести до певних проблем у виробництві та у споживачів. «Застосування РПН дозволяє регулювати напругу та навантаження без відключення від мережі. Перемикання РПН передбачено за допомогою кнопок у шафі управління (місцеве керування) або автоматично. Час перемикання положень РПН триває протягом 5-10 секунд.

Для підвищення надійності та збільшення ймовірності відмов РПН необхідно використовувати системи моніторингу та контролю. Було розглянуто дві системи моніторингу, їхню роботу та переваги.

У другому розділі розглянуто аналіз методів діагностики та розробка заходів з підвищення надійності пристроїв регулювання напруги в силових трансформаторах.

Найпоширенішими методами є візуальний огляд, а також методи зняття діаграм і вібродіагностики, оскільки вони вимагають мінімум персоналу та обладнання. Це також більш вигідно з фінансової точки зору, оскільки витрати не є колосальними.

У ході проведення технічного розрахунку було обрано перемикач VM III 350 Y – 72,5/C – 14,27W від компанії MR. У комплектацію пристроїв РПН входить моторний привід, який працює за допомогою електродвигунів. Перемикання розгалужень РПН може здійснюватися дистанційно за допомогою шафи управління, а також за допомогою релейних установок та автоматики. Окрім цього, розглядається варіант управління перемиканнями розгалужень регулювання за допомогою ручного важільного приводу, якщо моторний привід має несправності або на ньому відсутнє живлення.

Таким чином, пристрої регулювання напруги відіграють критичну роль у забезпеченні стабільності та ефективності роботи силових трансформаторів, гарантуючи якісну електроенергію для всіх споживачів. Їх застосування є необхідною умовою для надійної та економічної роботи електричних мереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні вимоги до роботи РПН.  
<https://ua.ahelek.net/info/what-is-the-function-of-the-tap-switch-in-the-81376909.html>
2. Яндутьський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б., Настенко Д.В. РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ Монографія НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
3. <http://ua.scotech-electrical.com/info/concept-of-voltage-regulation-in-transformers-86018469.html>
4. Технические данные и принцип работы основных типов РПН.  
<https://leg.co.ua/transformatory/praktika/tehnicheskie-dannye-i-princip-raboty-osnovnyh-tipov-rpn.html>
5. Комутаційні пристрої серії RS 9.3/RS Технічні характеристики ННІ-В Софія, Болгарія 2013 р.
6. <https://rza-promav.com/product/zahist-vvodu-i-vidhidnih-linij/pristriy-releynogo-zakhystu-linij-mrzs-f/>
7. <https://leg.co.ua/info/transformatory/tehnicheskie-dannye-rpn-transformatorov.html>
8. Системи моніторингу силових трансформаторів. <https://monada-group.com/monitoring-transformator/>
9. [https://delta.in.ua/diagnost\\_05\\_14.html](https://delta.in.ua/diagnost_05_14.html)
10. <https://ua.electric-test.com/info/common-fault-types-of-transformers-88904996.html>
11. Діагностика стану електротехнічного обладнання конспект лекцій МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022
12. Т.І. Долішній, А.З. Стасів, С.М. Бабюк, к.т.н.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,  
Україна. ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної  
конференції молодих учених та студентів «АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ» – Тернопіль, 11-12 грудня 2024 року

13. Визначення положення рпн трансформаторів.

<https://studfile.net/preview/9181585/page:12/>

14. Трансформатори-практика ремонту. <https://www.tor-trans.com.ua/ua/transfix.html?srsltid=AfmBOoqYbj2QmGFXZlOk34Y-0WEQC4jfKUAwZMMY9-pPlvNz7rhhtgcg>

15. <https://forca.com.ua/info/spravka/spravochnye-dannye-po-transformatoram-s-vysshim-napryazheniem-110-kv.html>

16. В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН Частина IV. Трансформатори  
Вінницький національний технічний університет