

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Модернізація електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ»

КРБ.14ЕЕбд_31[3].08.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
спеціальності 141
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи *141ЕЕбд_31[3]*
ЛУЦЕНКО Микола

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент
СЕМЕНОВ Анатолій

Полтава – 2026 року

ВСТУП

Надійність функціонування електроенергетичних об'єктів є однією з визначальних умов безперервного електропостачання споживачів, стабільної роботи промисловості та забезпечення енергетичної безпеки держави. Важливе місце в цій системі займають відкриті розподільчі пристрої високої напруги, через які здійснюються приймання, комутація та передача електроенергії в магістральні та розподільні мережі.

Тривала експлуатація електрообладнання ВРП 220 кВ без належного технічного оновлення призводить до зниження його надійності, збільшення кількості відмов, ускладнення обслуговування та підвищення експлуатаційних витрат. Крім того, моральне старіння комутаційної апаратури, вимірювальних трансформаторів і пристроїв захисту знижує ефективність роботи електроустановки та обмежує можливості її подальшої експлуатації відповідно до сучасних нормативних вимог.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває модернізація електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ, яка передбачає заміну фізично зношених і технічно застарілих елементів на сучасні високовольтні апарати з покращеними експлуатаційними характеристиками. До таких елементів належать силові вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму, трансформатори напруги, обмежувачі перенапруг, а також системи релейного захисту, автоматики та моніторингу.

Модернізація ВРП 220 кВ дає змогу підвищити надійність електропостачання, зменшити ризик аварійних режимів, покращити рівень електробезпеки обслуговуючого персоналу та знизити витрати на ремонт і технічне обслуговування. Додатковою перевагою є приведення параметрів обладнання у відповідність до сучасних вимог стандартів IEC, EN та чинних норм щодо експлуатації високовольтних електроустановок.

Мета роботи – розробити технічні рішення щодо модернізації електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ для підвищення надійності, безпеки та ефективності його функціонування.

Об'єкт дослідження – електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ, призначене для приймання, комутації та передачі електричної енергії.

Предмет дослідження – технічний стан, принципи вибору та параметри модернізації основного електрообладнання ВРП 220 кВ, а також заходи щодо підвищення його надійності, електробезпеки та економічної доцільності експлуатації.

Методи дослідження: аналіз технічної й нормативної документації; розрахунок струмів короткого замикання; вибір високовольтного обладнання за номінальними параметрами, термічною та електродинамічною стійкістю; розрахунок параметрів заземлювального пристрою і грозозахисту; техніко-економічне оцінювання запропонованих рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання: проаналізувати технічний стан діючого електрообладнання ВРП 220 кВ; обґрунтувати необхідність його модернізації; виконати розрахунок струмів короткого замикання; здійснити вибір сучасних вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму, трансформаторів напруги та обмежувачів перенапруг; перевірити вибране обладнання за умовами термічної та електродинамічної стійкості; розробити рішення щодо заземлення та грозозахисту ВРП 220 кВ; оцінити охорону праці, екологічні аспекти та економічну ефективність запропонованої модернізації.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані технічні рішення можуть бути використані під час оновлення високовольтного обладнання відкритих розподільчих пристроїв 220 кВ з метою підвищення надійності експлуатації, зменшення аварійності та покращення техніко-економічних показників роботи електроустановки.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА НАПРЯМИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВІДКРИТОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ 220 КВ

1.1 Особливості функціонування відкритих розподільчих пристроїв 220 кВ в енергосистемі

Відкриті розподільчі пристрої високої напруги є важливими елементами електроенергетичної системи, оскільки саме через них здійснюється приймання, комутація, розподіл і передача електричної енергії між генерувальними джерелами, підстанціями та магістральними лініями електропередачі. ВРП 220 кВ належить до відповідальних вузлів електричної мережі, від безаварійної роботи яких залежать надійність живлення споживачів, стійкість режимів роботи енергосистеми та якість електроенергії [1, 2].

Розподільчий пристрій даного класу напруги являє собою складний інженерний комплекс, до складу якого входять силові вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму, трансформатори напруги, струмопровідні та шинні конструкції, обмежувачі перенапруг, опорні ізолятори, кола релейного захисту, автоматики, сигналізації та пристрої заземлення [1, 3]. Кожен з цих елементів виконує окрему функцію, а їхня узгоджена робота забезпечує нормальне функціонування всієї електроустановки.

Основним завданням ВРП 220 кВ є виконання оперативних комутацій, розподіл потоків електричної енергії, підключення та відключення силових елементів мережі, локалізація аварійних режимів і створення умов для безпечного технічного обслуговування. У нормальному режимі роботи електрообладнання ВРП повинно забезпечувати тривале проходження номінальних струмів без перегріву, недопустимих втрат потужності та погіршення електричних характеристик. У перехідних і аварійних режимах воно має витримувати значні електродинамічні та термічні навантаження, викликані короткими замиканнями, комутаційними процесами та перенапругами [2, 4, 5].

Особливість відкритих розподільчих пристроїв полягає в тому, що їх обладнання розміщується під відкритим небом і постійно піддається впливу зовнішніх чинників. До таких чинників належать атмосферні опади, підвищена вологість, добові й сезонні коливання температури, сонячна радіація, вітер, пил, ожеледь, забруднення поверхні ізоляторів і металоконструкцій. Усе це впливає

на стан ізоляції, надійність контактних з'єднань, працездатність приводів комутаційної апаратури та довговічність конструктивних елементів [6, 7].

У процесі тривалої експлуатації на електрообладнання ВРП 220 кВ додатково впливають електричні старіння, механічні вібрації, ерозія контактів, зниження діелектричної міцності ізоляційних матеріалів та корозійні процеси. Через це зростає ймовірність появи пошкоджень, знижується комутаційний ресурс апаратів, виникає необхідність у частішому технічному обслуговуванні та ремонті. Особливо це стосується обладнання, яке експлуатується десятки років і морально застаріло порівняно із сучасними технічними рішеннями [8, 9].

Функціонування ВРП 220 кВ тісно пов'язане із забезпеченням стійкості енергосистеми. Будь-яке порушення у роботі вимикача, трансформатора струму або ізоляційної конструкції може призвести до обмеження пропускної здатності вузла, аварійного відключення лінії, пошкодження суміжного обладнання чи виникнення системних порушень. Саме тому до вибору, перевірки й експлуатації елементів ВРП висуваються підвищені вимоги щодо електричної, механічної та термічної стійкості.

Сучасні тенденції розвитку енергетики висувають додаткові вимоги до відкритих розподільчих пристроїв високої напруги. Це насамперед пов'язано зі зростанням навантаження на мережі, необхідністю інтеграції нових джерел генерації, підвищенням ролі цифрових систем керування, а також орієнтацією на міжнародні стандарти технічної сумісності, надійності та безпеки. За таких умов експлуатація застарілого обладнання стає не лише економічно не вигідною, а й технічно ризикованою [1, 8].

Ще однією важливою функцією ВРП 220 кВ є забезпечення селективної роботи систем релейного захисту та автоматики. Для цього необхідна висока точність вимірювальних трансформаторів, стабільність параметрів вторинних кіл, надійність комутаційних апаратів і швидкодія вимикачів. У разі пошкодження ці елементи повинні забезпечити своєчасне виявлення аварійної ділянки та її відключення з мінімальним впливом на інші частини мережі [10, 11].

Таким чином, відкритий розподільчий пристрій 220 кВ є не просто сукупністю окремих високовольтних апаратів, а складною функціональною системою, що визначає надійність електропередачі, рівень електробезпеки та ефективність роботи енергетичного об'єкта в цілому. Саме тому питання його технічного стану, вибору обладнання та модернізації мають важливе значення в умовах сучасного розвитку електроенергетики [2, 8, 9, 12].

1.2 Основні технічні підходи до модернізації електрообладнання ВРП 220 кВ

Модернізація електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ є комплексним інженерним завданням, що охоплює не лише заміну фізично зношених елементів, а й підвищення загального технічного рівня електроустановки. Її метою є забезпечення довготривалої, надійної, безпечної та економічно доцільної експлуатації обладнання в умовах сучасних вимог до електричних мереж високої напруги [1].

Необхідність модернізації, як правило, зумовлюється кількома факторами. По-перше, це фізичне старіння обладнання, яке призводить до погіршення його технічних характеристик, зменшення комутаційного ресурсу, втрати механічної міцності окремих вузлів та збільшення кількості дефектів. По-друге, моральне старіння апаратів, коли навіть працездатне обладнання вже не відповідає сучасним вимогам щодо надійності, вибіркості захисту, швидкодії, точності вимірювання, екологічності та ремонтпридатності. По-третє, зміна умов роботи енергооб'єкта, пов'язана зі збільшенням навантаження, перебудовою схем зовнішнього електропостачання або підвищенням вимог до стійкості роботи мережі [8, 9].

Одним із головних напрямів модернізації є заміна застарілих силових вимикачів на сучасні високовольтні апарати з покращеними комутаційними характеристиками. Сучасні елегазові вимикачі характеризуються високою вимикальною здатністю, надійністю гасіння електричної дуги, малим часом відключення, значним комутаційним ресурсом та нижчими витратами на експлуатацію. Завдяки високій діелектричній міцності ізоляційного середовища

вони забезпечують стабільну роботу в умовах високих напруг і значних струмів короткого замикання [2, 6].

Перевагою сучасних вимикачів є також зменшення потреби у складному технічному обслуговуванні. У порівнянні зі старими повітряними або масляними вимикачами вони мають меншу кількість обслуговуваних вузлів, кращу герметичність і вищу експлуатаційну надійність. Це особливо важливо для об'єктів, де безперервність електропостачання має пріоритетне значення.

Не менш важливим напрямом модернізації є оновлення роз'єднувачів і заземлювальних ножів. Хоча ці апарати не призначені для відключення струмів навантаження, їх робота безпосередньо пов'язана з безпечним виконанням оперативних перемикачів і ремонтних робіт. Сучасні роз'єднувачі мають удосконалену контактну систему, кращу механічну міцність, більш надійні приводи та підвищену стійкість до впливу кліматичних умов. Це дає змогу знизити ймовірність відмов, пов'язаних із погіршенням контактів, заїданням механізмів або недостатньою жорсткістю конструкції [3, 7].

Окреме значення має заміна вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Ці елементи забезпечують роботу систем обліку електроенергії, релейного захисту, автоматики, телемеханіки та диспетчерського контролю. У процесі модернізації доцільно застосовувати сучасні трансформатори з поліпшеними метрологічними характеристиками, вищою термічною та динамічною стійкістю, а також підвищеною довговічністю ізоляції. Це сприяє точнішому вимірюванню параметрів режиму, коректній роботі захистів та зменшенню імовірності помилкових спрацювань [10, 11].

Ще одним важливим елементом модернізації є встановлення сучасних обмежувачів перенапруг. В умовах дії атмосферних явищ та комутаційних процесів ізоляція обладнання ВРП може зазнавати небезпечних впливів імпульсних перенапруг. Застосування нелінійних ОПН дозволяє ефективно обмежити амплітуду перенапруги та захистити ізоляцію силового й вимірювального обладнання від пробую або прискореного старіння [5].

Суттєву роль у модернізації ВРП 220 кВ відіграє удосконалення системи заземлення. Заземлювальний пристрій повинен забезпечувати безпечний

розподіл струмів замикання на землю, обмеження напруги дотику та кроку в допустимих межах, а також створення надійного електричного зв'язку між усіма металевими неструмовідними частинами електроустановки. Під час модернізації часто виникає необхідність у розширенні контуру заземлення, заміні пошкоджених елементів, покращенні контактних з'єднань і перевірці відповідності параметрів заземлення чинним нормативам.

З модернізацією заземлення тісно пов'язане вдосконалення системи грозозахисту. Відкриті розподільчі пристрої є об'єктами, що мають значну площу та численні металоконструкції, тому є вразливими до прямих ударів блискавки та індукованих перенапруг. Рациональне розміщення блискавковідводів, правильний вибір зон захисту та надійний відвід імпульсного струму в землю є необхідними умовами безпечної роботи обладнання [13].

Сучасний технічний рівень модернізації ВРП неможливо уявити без оновлення систем релейного захисту, автоматики та моніторингу. Заміна електромеханічних пристроїв на мікропроцесорні термінали дозволяє підвищити точність і швидкодію захистів, реалізувати функції самодіагностики, аналізу, дистанційного керування та інтеграції в автоматизовані системи диспетчерського управління. Це значно розширює можливості оперативного персоналу та підвищує ефективність експлуатації енергооб'єкта [1, 8].

Окрім технічної сторони, модернізація повинна враховувати економічний аспект. Запропоновані рішення мають бути не лише технічно досконалими, а й економічно обгрунтованими. Вибір нового обладнання повинен враховувати його вартість, строк служби, витрати на монтаж, обслуговування, ремонт, втрати електроенергії, а також очікуваний ефект від підвищення надійності та зниження аварійності. Таким чином, кінцевою метою є отримання оптимального співвідношення між капітальними вкладеннями та довгостроковими експлуатаційними перевагами [8, 9].

При модернізації ВРП 220 кВ важливо дотримуватися принципу комплексності. Недостатньо замінити лише окремі апарати без урахування загальної схеми електроустановки, режимів її роботи, параметрів струмів короткого замикання, стану вторинних кіл, заземлення, ізоляції та систем

захисту. Лише системний підхід дозволяє забезпечити реальне підвищення надійності та ефективності функціонування об'єкта.

Отже, модернізація електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ є багатокомпонентним процесом, який охоплює оновлення комутаційної апаратури, вимірювальних трансформаторів, пристроїв захисту від перенапруг, систем заземлення, грозозахисту та цифрових засобів керування. Реалізація таких заходів сприяє підвищенню рівня технічної безпеки, покращенню показників надійності, зменшенню експлуатаційних витрат та продовженню ресурсу роботи енергетичного обладнання [1, 3, 5, 8, 9].

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто функціональне призначення та особливості роботи відкритих розподільчих пристроїв 220 кВ у складі електроенергетичної системи. Встановлено, що ВРП 220 кВ є відповідальним вузлом електричної мережі, через який здійснюються комутація, приймання, розподіл і передача електричної енергії, а його технічний стан безпосередньо впливає на надійність електропостачання та безпеку експлуатації.

Показано, що умови роботи обладнання ВРП 220 кВ характеризуються впливом значних електричних, теплових, механічних і кліматичних навантажень. Це призводить до поступового фізичного та морального старіння основних елементів електроустановки, зниження їх експлуатаційної надійності, збільшення частоти ремонтів і ускладнення технічного обслуговування.

У розділі також визначено основні технічні підходи до модернізації ВРП 220 кВ. До них належать заміна застарілих вимикачів, роз'єднувачів, вимірювальних трансформаторів і обмежувачів перенапруг, удосконалення систем заземлення та грозозахисту, а також впровадження сучасних цифрових пристроїв релейного захисту, автоматики й моніторингу.

Зроблено висновок, що модернізація електрообладнання ВРП 220 кВ є технічно необхідним і економічно доцільним заходом, який дозволяє підвищити безпеку, надійність і ефективність роботи електроенергетичного об'єкта, а також забезпечити його відповідність сучасним вимогам до високовольтних електроустановок.

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВРП 220 кВ

2.1 Об'єкт дослідження та його структура

Об'єктом дослідження у роботі є відкритий розподільчий пристрій 220 кВ, призначений для приймання, комутації, розподілу та передавання електричної енергії між генерувальними джерелами, силовими трансформаторами та високовольтними лініями електропередачі. За функціональним призначенням ВРП 220 кВ є одним із найбільш відповідальних елементів зовнішнього електропостачання, оскільки саме через нього забезпечується зв'язок енергооб'єкта з магістральною мережею та суміжними підстанціями [1–4].

Конструктивно ВРП 220 кВ виконується як відкрита система зовнішнього встановлення, у межах якої електрообладнання монтується на металевих або залізобетонних опорах, а електричні зв'язки між апаратами реалізуються за допомогою шинних і струмопровідних конструкцій. Загальні вимоги до такого обладнання визначаються стандартами ІЕС на високовольтну комутаційну апаратуру, координацію ізоляції та захист від перенапруг [1–5].

До складу ВРП 220 кВ входять такі основні групи обладнання:

- силові вимикачі, призначені для вмикання і вимикання робочих струмів, а також для відключення струмів короткого замикання [2, 6];
- роз'єднувачі та заземлювальні ножі, які забезпечують видимий розрив кола й умови безпечного виконання ремонтних робіт [3, 7];
- трансформатори струму і напруги для живлення кіл вимірювання, релейного захисту, автоматики та обліку електроенергії [10, 11];
- обмежувачі перенапруг, які обмежують рівень атмосферних і комутаційних імпульсів [5];
- збірні шини, шиноз'єднувальні та приєднувальні елементи;
- опорні ізолятори, металоконструкції, приводи апаратів, вторинні кола, кабельні зв'язки та заземлювальний пристрій [1, 6, 12, 13].

У даній роботі ВРП 220 кВ розглядається як сукупність комірок, що забезпечують роботу лінійних приєднань, приєднань силових трансформаторів, секціонування шин, вимірювання напруги на шинах та резервування схеми. У

практиці проєктування для такого класу напруги застосовують схеми з однією або двома робочими системами шин, а також схеми з обхідною системою шин, що підвищує гнучкість під час ремонтів і перемикачів [8, 9].

З функціональної точки зору ВРП 220 кВ має забезпечувати:

- пропускання робочого навантаження без перегріву струмовідних частин;
- надійне відключення аварійних струмів;
- достатню електродинамічну та термічну стійкість апаратів;
- належний рівень зовнішньої та внутрішньої ізоляції;
- безпечні умови для оперативного персоналу та ремонтних бригад [1–4, 12].

Важливою особливістю ВРП є його робота під безпосереднім впливом зовнішніх кліматичних факторів. Через це обладнання повинно мати високу механічну міцність, стійкість до забруднення, вологи, обмерзання, вітрових навантажень та температурних коливань. Для апаратів 220 кВ це має особливе значення, оскільки навіть незначне погіршення стану ізоляції або контактної системи може призвести до часткових розрядів, нагріву контактів, зниження надійності комутації та аварійних відключень [1, 4, 8].

У межах роботи технічний стан ВРП 220 кВ розглядається через оцінювання основних груп обладнання: вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму, трансформаторів напруги та обмежувачів перенапруг. Для цього використовуються паспортні характеристики існуючих апаратів, результати порівняння їх параметрів з сучасними вимогами та оцінка доцільності подальшої експлуатації або заміни.

На рис. 2.1 наведено однолінійну схему ВРП 220 кВ, а на рис.2.2 компоновку комірки ВРП 220 кВ.

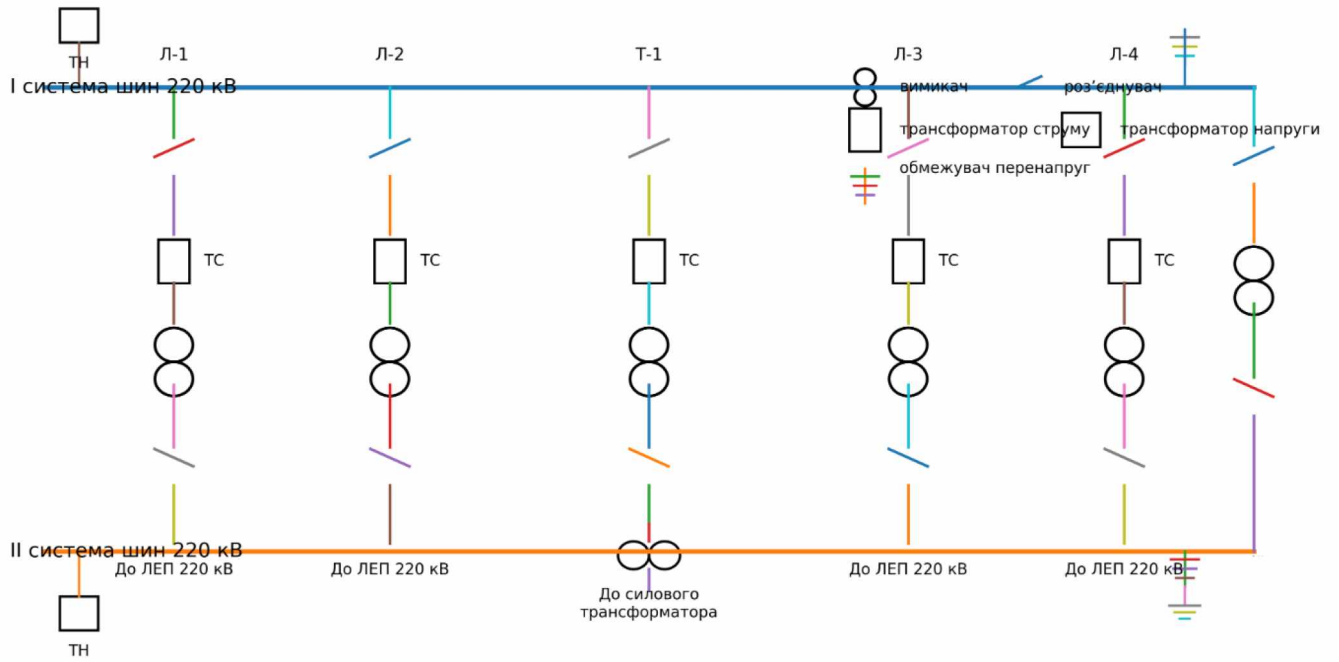


Рисунок 2.1 – Однолінійна схема відкритого розподільчого пристрою 220 кВ

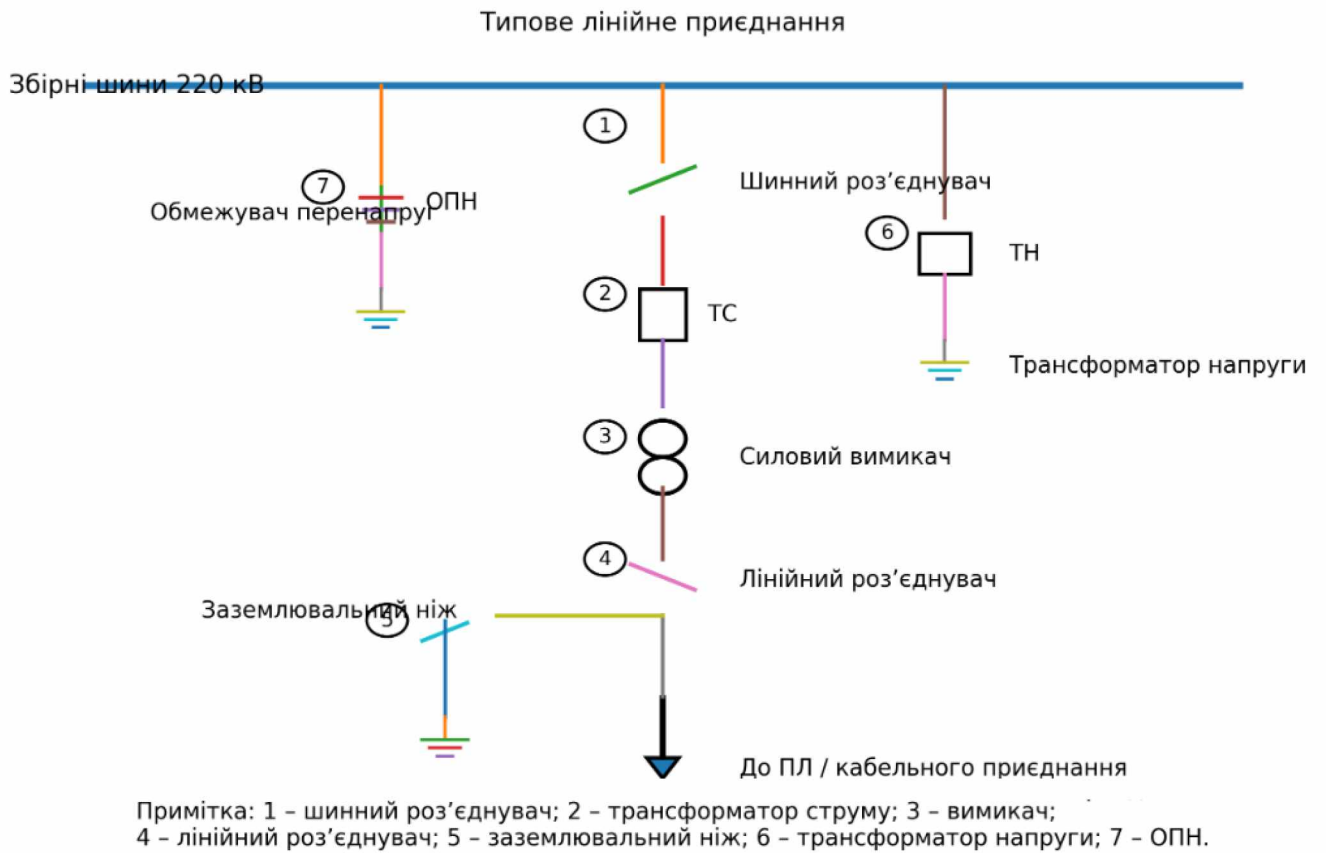


Рисунок 2.2 – Компонівка комірки ВРП 220 кВ

Типова комірка ВРП 220 кВ включає шинний роз'єднувач, трансформатор струму, силовий вимикач, лінійний роз'єднувач, заземлювальний ніж, трансформатор напруги та обмежувач перенапруг. Така компоновка забезпечує виконання комутаційних операцій, вимірювання електричних параметрів, захист обладнання від перенапруг і безпечне виведення приєднання в ремонт.

В табл. 2.1 представлені основні елементи ВРП 220 кВ та їх призначення.

Таблиця 2.1 – Основні елементи ВРП 220 кВ та їх призначення.

Елемент ВРП	Основне призначення
Силовий вимикач	Комутація робочих і аварійних струмів
Роз'єднувач	Створення видимого розриву кола
Заземлювальний ніж	Заземлення виведеного в ремонт обладнання
Трансформатор струму	Передавання сигналу струму в кола захисту й вимірювання
Трансформатор напруги	Передавання сигналу напруги в кола автоматики та вимірювання
Обмежувач перенапруг	Захист ізоляції від грозових і комутаційних перенапруг
Збірні шини	Об'єднання приєднань і передавання потужності
Заземлювальний пристрій	Забезпечення електробезпеки та відведення струмів замикання

На практиці надійність ВРП багато в чому визначається не лише схемою, а й технічним рівнем окремих апаратів. Дослідження надійності підстанційних схем показують, що перехід до сучасних комутаційних апаратів і раціональних схемних рішень дозволяє зменшити імовірність відмов і скоротити витрати на обслуговування [8, 9].

2.2 Склад і технічні параметри основного електрообладнання ВРП 220 кВ

Для технічного аналізу у роботі доцільно прийняти типовий склад діючого обладнання ВРП 220 кВ, характерний для об'єктів, що тривалий час перебували в експлуатації: повітряні вимикачі, роз'єднувачі зовнішнього встановлення, електромагнітні трансформатори струму, індуктивні або ємнісні трансформатори напруги та нелінійні обмежувачі перенапруг. Саме така структура обладнання наявна і в зразку бакалаврської роботи, який ви надали.

З позиції модернізації доцільно розглядати не все обладнання електростанції чи підстанції, а саме ті апарати, що безпосередньо формують технічний стан ВРП 220 кВ: вимикачі; роз'єднувачі; трансформатори струму; трансформатори напруги; обмежувачі перенапруг; шинні з'єднання та ізоляційні конструкції.

2.2.1 Оцінка робочих струмів приєднань

Одним з основних критеріїв під час аналізу технічного стану обладнання є відповідність його номінальних параметрів робочим режимам. Для трифазної системи номінальний струм приєднання визначається за формулою:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$$

де S – повна потужність приєднання, МВА; U – лінійна напруга, кВ; I – фазний струм, кА.

Для характерних приєднань ВРП 220 кВ отримаємо:

1. Для силового трансформатора потужністю 250 МВА: $I_{250}=656$ А
2. Для автотрансформатора потужністю 125 МВА: $I_{125}=328$ А
3. Для умовного лінійного приєднання потужністю 400 МВА:

$$I_{400}=1050 \text{ А}$$

Таким чином, отримані розрахункові робочі струми типових приєднань ВРП 220 кВ наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахункові робочі струми типових приєднань
ВРП 220 кВ

Приєднання	Потужність, МВА	Напруга, кВ	Розрахунковий струм, А
Силовий трансформатор	250	220	656
Автотрансформатор	125	220	328
Лінійне приєднання	400	220	1050

Отримані значення показують, що за робочими струмами більшість традиційних апаратів класу 220 кВ мають достатній запас. Проте потреба в модернізації зумовлюється не лише номінальним струмом, а й комутаційним ресурсом, станом ізоляції, надійністю приводів, можливістю роботи із сучасними цифровими системами захисту та відповідністю чинним стандартам [1–3, 8, 9].

2.2.2 Технічні параметри основного обладнання, що аналізується

Для оцінювання технічного стану ВРП 220 кВ у роботі можна використати такі базові характеристики існуючого обладнання, прийнятого для аналізу зі зразка (табл. 2.3, 2.4, 2.5).

Таблиця 2.3 – Технічні параметри вимірювальних трансформаторів

Найменування	Основні параметри
Трансформатор струму ТФЗМ-220	Номінальна напруга – 220 кВ; найбільша робоча напруга – 252 кВ; номінальний струм – 1000/5 А
Трансформатор напруги НКФ-220	Номінальна напруга – 220 кВ; первинна напруга – $220000/\sqrt{3}$ В; вторинна – $100/\sqrt{3}$ В;

	номінальна потужність – 1200 ВА; гранична потужність – 2000 ВА; клас точності – 3
--	---

Таблиця 2.4 – Технічні параметри комутаційної апаратури

Найменування	Основні параметри
Роз'єднувач РДЗ-1-220/3200	Номінальна напруга – 220 кВ; номінальний струм – 3200 А; граничний наскрізний струм – 125 кА; струм термічної стійкості – 50 кА/3 с
Вимикач повітряний ВВН-220-15	Номінальний струм – 3150 А; струм вимкнення – 63 кА; ударний струм – 162 кА; час вимкнення – 0,04 с; час ввімкнення – 0,1 с

Таблиця 2.5 – Технічні параметри обмежувача перенапруг

Найменування	Основні параметри
ОПН-220	Номінальна напруга – 220 кВ; найбільша робоча напруга – 146 кВ; залишкова напруга при розрахунковому струмі комутаційної перенапруги – не більше 360 кВ

Ці апарати забезпечують функції вимірювання й живлення кіл релейного захисту, але за сучасних умов поступаються новим трансформаторам за точністю, довговічністю ізоляції, стійкістю до зовнішніх впливів та зручністю інтеграції у цифрові системи [10, 11, 14–16].

Хоча наведені параметри свідчать про достатню пропускну здатність і допустимий рівень стійкості до струмів короткого замикання, повітряні вимикачі старих серій мають нижчу експлуатаційну надійність і вищі витрати на обслуговування порівняно із сучасними елегазовими вимикачами [2, 6, 8].

Захист від перенапруг є критично важливим для ВРП 220 кВ, оскільки ізоляція обладнання зовнішнього встановлення піддається дії атмосферних та

комутаційних імпульсів. Основні вимоги до металоксидних ОПН для мереж змінного струму регламентує IEC 60099-4 [5].

2.2.3 Порівняння робочих струмів із номінальними параметрами апаратів

Для попередньої оцінки навантаження апаратів використаємо коефіцієнт завантаження:

$$R_3 = \frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{ном}}}$$

Для трансформаторного приєднання 250 МВА (табл. 2.6): для вимикача ВВН-220-15: $k_{3,\text{вим}}=0,21$; для роз'єднувача РДЗ-1-220/3200: $k_{3,\text{роз}}=0,205$; для трансформатора струму 1000/5: $k_{3,\text{ТС}}=0,656$.

Таблиця 2.6 – Коефіцієнти завантаження існуючих апаратів для приєднання 250 МВА

Апарат	Номінальний струм, А	Робочий струм, А	k_3
Вимикач ВВН-220-15	3150	656	0,21
Роз'єднувач РДЗ-1-220/3200	3200	656	0,205
Трансформатор струму ТФЗМ-220	1000	656	0,656

Отже, за робочими струмами традиційне обладнання ще має достатній запас. Однак це не усуває необхідності його заміни, оскільки ключовими факторами модернізації є технічний ресурс, моральне старіння конструкцій, стан ізоляції, складність ремонту та невідповідність сучасним вимогам експлуатаційної надійності [6–9].

2.2.4 Оцінка технічного стану обладнання ВРП 220 кВ

Під час технічного аналізу доцільно враховувати не лише паспортні дані, а й якісні ознаки старіння. Для обладнання, що тривалий час експлуатується, найбільш характерними є: зношування контактної системи вимикачів і роз'єднувачів; погіршення стану ізоляції; зниження надійності механічних приводів; збільшення тривалості та вартості ремонту; ускладнення забезпечення запасними частинами; обмежені можливості інтеграції у сучасні системи релейного захисту та моніторингу [6–13]. Узагальнена оцінка технічного стану обладнання ВРП 220 кВ представлена в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Узагальнена оцінка технічного стану обладнання ВРП 220 кВ

Група обладнання	Технічний стан	Основні недоліки	Доцільний захід
Повітряні вимикачі	Незадовільний / застарілий	Великий обсяг обслуговування, старіння ізоляції, зниження надійності	Заміна на сучасні елегазові
Роз'єднувачі старих серій	Задовільний, але морально застарілий	Зношення контактів і приводів	Заміна або капітальний ремонт
Трансформатори струму	Задовільний	Обмеження на точність і ресурс ізоляції	Заміна на сучасні ТС
Трансформатори напруги	Задовільний	Обмежені функціональні можливості	Модернізація або заміна

ОПН старих серій	Потребує перевірки	Старіння нелінійних елементів	Заміна на сучасні ОПН
------------------	--------------------	-------------------------------	-----------------------

Таким чином, результати аналізу підтверджують, що технічний стан ВРП 220 кВ слід оцінювати комплексно: за номінальними параметрами, робочими режимами, станом ізоляції, надійністю комутації та придатністю до подальшої інтеграції у сучасні системи керування.

Висновки до розділу 2

У розділі розглянуто відкритий розподільчий пристрій 220 кВ як об'єкт дослідження та визначено його місце у структурі електроенергетичного об'єкта. Встановлено, що ВРП 220 кВ є складним технічним комплексом, який включає вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму, трансформатори напруги, обмежувачі перенапруг, шинні конструкції та заземлювальний пристрій.

На основі аналізу робочих режимів визначено розрахункові струми для типових приєднань 220 кВ. Показано, що існуюче обладнання має достатній запас за робочими струмами, однак це не виключає потреби в модернізації, оскільки головними проблемами є фізичний знос, моральне старіння, зниження комутаційного ресурсу та невідповідність сучасним вимогам до надійності та технічного обслуговування.

Узагальнена оцінка технічного стану обладнання показала, що найбільш доцільними напрямами подальшої модернізації є заміна застарілих повітряних вимикачів, оновлення роз'єднувачів, вимірювальних трансформаторів і обмежувачів перенапруг, а також підготовка ВРП 220 кВ до використання сучасних цифрових систем релейного захисту та моніторингу.

РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВІДКРИТОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ 220 кВ

3.1 Обґрунтування необхідності модернізації ВРП 220 кВ

Необхідність модернізації відкритого розподільчого пристрою 220 кВ зумовлена сукупністю технічних, експлуатаційних і економічних чинників. Основною причиною є тривала експлуатація обладнання, унаслідок чого відбувається його фізичне зношення, знижується комутаційний ресурс апаратів, погіршується стан ізоляції та зростає ймовірність відмов у нормальних і аварійних режимах [1–4, 8, 9].

Для ВРП 220 кВ найбільш критичними є такі проблеми: старіння силових вимикачів та зниження їх надійності; погіршення механічного стану роз'єднувачів і приводів; зношування контактних з'єднань та струмопровідних частин; моральне старіння вимірювальних трансформаторів; недостатня адаптованість існуючого обладнання до сучасних цифрових систем релейного захисту й моніторингу [1, 2, 8, 9, 18].

Важливою передумовою модернізації є також невідповідність частини діючого обладнання сучасним вимогам міжнародних стандартів щодо комутаційної здатності, електродинамічної стійкості, надійності роботи в зовнішніх умовах та координації ізоляції [1–5].

Отже, модернізація ВРП 220 кВ є технічно обґрунтованою, оскільки дозволяє підвищити надійність функціонування електроустановки, знизити ризик аварійних вимкень, скоротити витрати на ремонт і технічне обслуговування, забезпечити сумісність з сучасними засобами релейного захисту та автоматики та привести параметри обладнання у відповідність до чинних вимог і стандартів [1–5, 8, 9].

3.2 Розрахунок струмів короткого замикання

Під час модернізації ВРП 220 кВ одним із ключових етапів є визначення струмів короткого замикання, оскільки саме вони визначають вимоги до вибору нового високовольтного обладнання за умовами термічної та електродинамічної

стійкості [1–4]. У розділі приймаємо для подальшого вибору обладнання такі розрахункові значення трифазного короткого замикання: у точці К1 $I_{к1}^{(3)} = 34,05$ кА; у точці К2 $I_{к2}^{(3)} = 21,62$ кА.

Для класу напруги 220 кВ найбільше навантаження на комутаційну апаратуру зазвичай створює трифазне коротке замикання, тому саме цей режим використовується як визначальний під час перевірки вимикачів, роз'єднувачів і струмопровідних елементів.

Визначення ударного струму короткого замикання

Для попередньої перевірки електродинамічної стійкості визначаємо ударний струм:

$$i_{уд} = k_{уд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_k$$

Для мереж високої напруги в розрахунках часто приймають:

$$i_{уд} \approx 2,55 \cdot I_k$$

Тоді для точки К1:

$$i_{уд1} = 2,55 \cdot 34,05 = 86,83 \text{ кА}$$

Для точки К2:

$$i_{уд2} = 2,55 \cdot 21,62 = 55,13 \text{ кА}$$

Визначення теплового імпульсу

Для перевірки термічної стійкості обладнання визначаємо тепловий імпульс:

$$W_k = I_k^2 \cdot t$$

Для прийнятого часу $t = 3$ с:

$$B_{k1} = 34,05^2 \cdot 3 = 3478,2 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$B_{k2} = 21,62^2 \cdot 3 = 1402,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Розрахункові значення струмів короткого замикання наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення струмів короткого замикання

Точка КЗ	$I_k^{(3)}$, кА	$i_{уд}$, кА	B_k , кА ² ·с
К1	34,05	86,83	3478,2
К2	21,62	55,13	1402,3

Отримані значення свідчать, що обладнання ВРП 220 кВ має вибиратися з урахуванням найбільш важкого режиму, тобто точки К1.

Вибір та перевірка обладнання за термічною та електродинамічною стійкістю

Одним із найважливіших етапів технічного обґрунтування модернізації ВРП 220 кВ є вибір нового електрообладнання та його перевірка за умовами роботи в нормальних і аварійних режимах. Для високовольтних апаратів недостатньо враховувати лише номінальну напругу та робочий струм, оскільки в процесі експлуатації вони піддаються дії значних теплових і механічних навантажень, особливо під час коротких замикань.

У момент виникнення короткого замикання через струмовідні частини апаратів проходять великі струми, які створюють два основні види впливу. Перший з них — термічний, що проявляється у нагріванні контактів, шин, струмопровідних деталей і провідників внаслідок виділення теплоти. Другий — електродинамічний, що пов'язаний із виникненням значних механічних зусиль між провідниками та струмовідними елементами. Якщо обладнання не має достатньої стійкості до таких впливів, це може призвести до деформації контактної системи, порушення ізоляції, пошкодження струмовідних частин або повної відмови апарата.

Саме тому вибір високовольтного обладнання для ВРП 220 кВ виконується не лише за умовами нормального режиму, а й за здатністю витримувати

найбільш несприятливі аварійні режими. Для цього використовують розраховані значення струмів короткого замикання, ударних струмів і теплових імпульсів, які порівнюють із паспортними характеристиками вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму та інших елементів розподільчого пристрою.

У межах цього підрозділу здійснюється вибір сучасного обладнання для модернізації ВРП 220 кВ, а також його перевірка за основними технічними критеріями: класом напруги, номінальним струмом, вимикальною здатністю, термічною стійкістю та електродинамічною витривалістю. Такий підхід дає змогу обґрунтувати доцільність застосування вибраних апаратів і підтвердити їх відповідність умовам експлуатації в складі відкритого розподільчого пристрою 220 кВ.

Вибір силового вимикача

Для модернізації ВРП 220 кВ приймаємо сучасний елегазовий вимикач HPL 245 B1 [2, 6].

Основні технічні характеристики вимикача HPL 245 B1 наведено в табл. 3.2.

Перевірка вимикача, за напругою:

$$U_{\text{ном}} = 245 \text{ кВ} > U_{\text{роб}} = 220 \text{ кВ}$$

умова виконується.

Перевірка вимикача за робочим струмом:

$$I_{\text{ном}} = 4000 \text{ А} > I_{\text{роб}}$$

Перевірка вимикача за струмом вимкнення:

$$I_{\text{вимк}} = 63 \text{ кА} > I_{\text{к1}} = 34,05 \text{ кА}$$

Для розглянутих у розділі 2 приєднань максимальний робочий струм не перевищує 1050 А, отже запас достатній.

Перевірка вимикача за електродинамічною стійкістю:

$$i_{\text{вкл}} = 160 \text{ кА} > i_{\text{удл}} = 86,83 \text{ кА}$$

Перевірка вимикача за термічною стійкістю:

$$I_{\text{терм}} = 63 \text{ кА} > 34,05 \text{ кА}$$

Отже, вимикач HPL 245 В1 відповідає умовам експлуатації у ВРП 220 кВ (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики вимикача HPL 245 В1

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Номінальний струм, А	4000
Номінальний струм вимкнення, кА	63
Струм термічної стійкості, кА / с	63 / 3
Струм вмикання, кА	160
Повний час вимкнення, мс	40

Вибір роз'єднувача

Для ВРП 220 кВ приймаємо роз'єднувач класу SGF 245 [3, 7], характеристики якого наведено в табл. 3.3.

Перевірка роз'єднувача:

за напругою: $245 > 220$ кВ;

за струмом: навіть мінімальне виконання 1600 А перевищує максимальний робочий струм приєднання;

за електродинамічною стійкістю: $100 \text{ кА} > 86,83 \text{ кА}$

за термічною стійкістю: $40 \text{ кА} > 34,05 \text{ кА}$

Отже, роз'єднувач SGF 245 також відповідає умовам вибору.

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики роз'єднувача SGF 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Номінальний струм, А	1600–4000
Струм електродинамічної стійкості, кА	100 / 125
Струм термічної стійкості, кА	40 / 50

Вибір трансформатора струму

Для нового ВРП приймаємо трансформатор струму ІМВ 245 [10], характеристики якого наведено в табл. 3.4.

Перевірка: за напругою - відповідає; за первинним струмом - достатній запас; за термічною стійкістю:

$$63 \text{ кА} > 34,05 \text{ кА}$$

за електродинамічною стійкістю:

$$160 \text{ кА} > 86,83 \text{ кА}$$

Трансформатор струму ІМВ 245 може бути прийнятий до встановлення.

Таблиця 3.4 – Основні технічні характеристики трансформатора струму ІМВ 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Максимальний первинний струм, А	до 4000
Струм термічної стійкості, кА	до 63
Струм електродинамічної стійкості, кА	до 160

Вибір трансформатора напруги

Для вимірювання напруги та живлення вторинних кіл приймаємо ємнісний трансформатор напруги СРВ 245 [11].

Основні технічні характеристики трансформатора напруги СРВ 245 наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики трансформатора напруги СРВ 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Тип	Ємнісний
Допустимий коефіцієнт напруги	до 1,9 (8 годин)
Кліматичне виконання	для зовнішнього встановлення

Такий трансформатор напруги забезпечує роботу кіл вимірювання, обліку та захисту, а його параметри відповідають класу напруги 220 кВ [11].

Вибір обмежувача перенапруг

Для захисту ізоляції ВРП 220 кВ від атмосферних і комутаційних перенапруг застосовується металоксидний обмежувач перенапруг відповідно до ІЕС 60099-4 [5].

Основні критерії вибору ОПН для ВРП 220 кВ наведено в табл. 3.6.

Обраний ОПН повинен забезпечувати координацію ізоляції ВРП 220 кВ та обмежувати перенапруги до рівня, безпечного для вимикачів, трансформаторів струму й напруги [4, 5].

Таблиця 3.6 – Основні критерії вибору ОПН для ВРП 220 кВ

Критерій	Умова вибору
Найбільша робоча напруга	Відповідність напрузі мережі

Залишкова напруга	Має бути нижчою за допустимий рівень для ізоляції
Енергетична стійкість	Має забезпечувати роботу при грозових і комутаційних імпульсах
Виконання	Для зовнішнього встановлення

3.4 Узагальнені результати вибору обладнання

На підставі виконаних розрахунків і технічного аналізу можна зробити висновок, що модернізація відкритого розподільчого пристрою 220 кВ повинна здійснюватися із застосуванням сучасного високовольтного обладнання [19], параметри якого відповідають умовам нормальної та аварійної роботи електроустановки. Вибір апаратів проводився з урахуванням класу напруги, допустимого робочого струму, вимикальної здатності, термічної та електродинамічної стійкості, а також придатності до експлуатації в умовах зовнішнього встановлення.

У результаті перевірки встановлено, що обрані сучасні вимикачі, роз'єднувачі, трансформатори струму і трансформатори напруги мають необхідний запас за основними технічними параметрами. Це свідчить про можливість їх надійної роботи в складі ВРП 220 кВ при допустимих робочих навантаженнях і в режимах коротких замикань. Особливо важливим є те, що технічні характеристики нового обладнання перевищують розрахункові значення струмів короткого замикання, ударних струмів і теплових імпульсів, визначених для найбільш навантажених точок схеми.

Таким чином, результати проведеного вибору підтверджують технічну доцільність прийнятих рішень щодо модернізації ВРП 220 кВ. Для узагальнення отриманих результатів у таблиці 3.7 наведено перевірку основних параметрів обраного обладнання на відповідність розрахунковим вимогам.

Таблиця 3.7 – Перевірка обраного обладнання ВРП 220 кВ

Обладнання	Основний параметр	Розрахункова вимога	Паспортне значення	Висновок
Вимикач HPL 245 B1	Струм вимкнення, кА	34,05	63	Підходить
Вимикач HPL 245 B1	Ударний струм, кА	86,83	160	Підходить
Роз'єднувач SGF 245	Термічна стійкість, кА	34,05	40–50	Підходить
Роз'єднувач SGF 245	Електродинамічна стійкість, кА	86,83	100–125	Підходить
ТС ІМВ 245	Термічна стійкість, кА	34,05	до 63	Підходить
ТС ІМВ 245	Електродинамічна стійкість, кА	86,83	до 160	Підходить
ТН СРВ 245	Клас напруги, кВ	220	245	Підходить

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У розділі виконано технічне обґрунтування модернізації відкритого розподільчого пристрою 220 кВ. Встановлено, що основними причинами модернізації є фізичне та моральне старіння обладнання, зниження його надійності, зростання витрат на технічне обслуговування та невідповідність сучасним вимогам до високовольної апаратури.

Для подальшого вибору нового обладнання прийнято розрахункові значення струмів короткого замикання в характерних точках ВРП 220 кВ. На їх основі визначено ударні струми та теплові імпульси, що дозволило перевірити обладнання за умовами електродинамічної та термічної стійкості.

У результаті аналізу для модернізації ВРП 220 кВ обрано сучасні апарати: елегазовий вимикач HPL 245 B1, роз'єднувач SGF 245, трансформатор струму ІМВ 245 та трансформатор напруги СРВ 245. Перевірка показала, що їх технічні характеристики перевищують розрахункові вимоги, отже вибране обладнання може бути рекомендоване для застосування у проєкті модернізації.

РОЗДІЛ 4 ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ГРОЗОЗАХИСТ ВІДКРИТОГО РОЗПОДІЛЬЧОГО ПРИСТРОЮ 220 КВ

4.1 Технічні характеристики обладнання

У попередньому розділі було виконано вибір основного електрообладнання для модернізації відкритого розподільчого пристрою 220 кВ та перевірено його за умовами роботи в нормальних і аварійних режимах. Наступним етапом є узагальнення технічних характеристик обраних апаратів, аналіз їх конструктивних особливостей і визначення переваг застосування у складі ВРП 220 кВ [1–3, 6, 7, 10, 11].

До складу обладнання, прийнятого для модернізації, входять:

- елегазовий силовий вимикач;
- роз'єднувач зовнішнього встановлення;
- трансформатор струму;
- трансформатор напруги;
- обмежувач перенапруг;
- допоміжні елементи: опорні ізолятори, приводи, струмопровідні частини, вторинні кола та заземлювальні з'єднання.

Застосування сучасного обладнання дозволяє не лише підвищити надійність роботи ВРП 220 кВ, а й покращити умови експлуатації, скоротити витрати на технічне обслуговування та забезпечити відповідність діючим вимогам міжнародних стандартів до високовольтної апаратури [1–5].

Технічні характеристики силового вимикача

Для модернізації ВРП 220 кВ у роботі прийнято елегазовий вимикач типу HPL 245 V1. Такі вимикачі призначені для комутації робочих струмів, а також для швидкого і надійного відключення струмів короткого замикання. Вони характеризуються високою вимикальною здатністю, значним механічним ресурсом та придатністю до експлуатації у відкритих розподільчих пристроях [2, 6].

Принцип дії елегазового вимикача ґрунтується на використанні середовища SF₆, яке має високу діелектричну міцність і добрі дугогасильні

властивості. Це забезпечує ефективне гасіння електричної дуги у момент розмикання контактів і дозволяє зменшити габарити апарата порівняно з обладнанням попередніх поколінь.

Таблиця 4.1 – Основні технічні характеристики вимикача HPL 245 B1

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Номінальна частота, Гц	50
Номінальний струм, А	4000
Номінальний струм вимкнення, кА	63
Струм термічної стійкості, кА / с	63 / 3
Струм вмикання, кА	160
Час вмикання, мс	< 60
Повний час вимкнення, мс	40

Основними перевагами обраного вимикача є: висока комутаційна здатність; придатність до роботи при значних струмах КЗ; компактність конструкції; герметичність полюсів; менший обсяг обслуговування порівняно з повітряними вимикачами [2, 6].

Технічні характеристики роз'єднувача

Для модернізації ВРП 220 кВ прийнято роз'єднувач типу SGF 245 (табл. 4.2), який забезпечує створення видимого розриву в електричному колі та безпечно виведення обладнання в ремонт. Роз'єднувачі цього класу призначені для зовнішнього встановлення і мають механічно міцну конструкцію, розраховану на роботу під дією вітрових, ожеледних та електродинамічних навантажень [3, 7].

Перевагами сучасного роз'єднувача є покращена контактна система, надійна робота приводів та менша ймовірність відмов унаслідок зносу механізмів [3, 7].

Таблиця 4.2 – Основні технічні характеристики роз'єднувача SGF 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Номінальний струм, А	1600–4000
Струм електродинамічної стійкості, кА	100–125
Струм термічної стійкості, кА	40–50
Тип встановлення	Зовнішній
Наявність заземлювальних ножів	Передбачено

Технічні характеристики трансформатора струму

Для вимірювання струму та живлення кіл релейного захисту і автоматики в роботі прийнято трансформатор струму ІМВ 245 (табл. 4.3). Такі апарати застосовуються на високовольтних підстанціях і ВРП напругою до 245 кВ та мають достатній запас термічної й електродинамічної стійкості [10].

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики трансформатора струму ІМВ 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Максимальний первинний струм, А	до 4000
Вторинний струм, А	1 або 5
Струм термічної стійкості, кА	до 63
Струм електродинамічної стійкості, кА	до 160
Тип ізоляції	Високовольтна паперово-масляна/комбінована

Такі трансформатори струму забезпечують точне відтворення первинних струмів у вторинних колах та придатні для сучасних систем вимірювання і мікропроцесорного захисту [10].

Технічні характеристики трансформатора напруги

Для контролю напруги, живлення кіл вимірювання, автоматики і захисту прийнято трансформатор напруги СРВ 245 ємнісного типу (табл.4.4). Він забезпечує стійку роботу в умовах зовнішнього встановлення та відповідає параметрам мережі 220 кВ [11].

Таблиця 4.4 – Технічні характеристики трансформатора напруги СРВ 245

Параметр	Значення
Номінальна напруга, кВ	245
Найбільша робоча напруга, кВ	252
Тип	Ємнісний
Допустимий коефіцієнт напруги	до 1,9 (8 год)
Умови встановлення	Зовнішнє
Призначення	Вимірювання, захист, автоматика

Застосування сучасного трансформатора напруги дозволяє підвищити стабільність параметрів вторинних кіл і покращити роботу пристроїв контролю та релейного захисту [11].

Технічні характеристики обмежувача перенапруг

Захист ізоляції обладнання ВРП 220 кВ від комутаційних та атмосферних перенапруг забезпечується застосуванням сучасних металоксидних обмежувачів перенапруг без іскрових проміжків (табл. 4.5). Основні вимоги до таких апаратів регламентує ІЕС 60099-4 [5].

Таблиця 4.5 – Основні технічні характеристики ОПН для ВРП 220 кВ

Параметр	Значення
Клас напруги мережі, кВ	220

Найбільша робоча напруга, кВ	відповідно до мережі
Тип	Металоксидний нелінійний
Виконання	Для зовнішнього встановлення
Призначення	Обмеження грозових і комутаційних перенапруг

Застосування ОПН знижує ризик пробоею ізоляції та сприяє підвищенню загальної надійності роботи ВРП [4, 5].

Узагальнення технічних характеристик обраного обладнання

Узагальнені технічні характеристики обладнання, прийнятого до модернізації наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Узагальнені технічні характеристики обладнання, прийнятого до модернізації

Найменування	Тип	Номінальна напруга, кВ	Основна характеристика
Вимикач	HPL 245 B1	245	Струм вимкнення 63 кА
Роз'єднувач	SGF 245	245	Термічна стійкість до 50 кА
Трансформатор струму	IMB 245	245	Первинний струм до 4000 А
Трансформатор напруги	CPB 245	245	Ємнісний тип
Обмежувач перенапруг	ОПН 220 кВ	220	Захист від імпульсних перенапруг

Отже, узагальнені характеристики свідчать, що вибране обладнання відповідає умовам роботи ВРП 220 кВ і може бути використане для модернізації відкритого розподільчого пристрою.

4.2 Захисне заземлення та грозозахист ВРП 220 кВ

Для забезпечення безпечної експлуатації ВРП 220 кВ важливе значення мають система захисного заземлення та засоби грозозахисту. Вони запобігають виникненню небезпечних потенціалів на металевих неструмовідних частинах обладнання, забезпечують відведення струмів замикання на землю та захищають апарати від впливу атмосферних перенапруг [20, 21].

Призначення та основні вимоги до заземлення

Заземлювальний пристрій ВРП 220 кВ повинен забезпечувати:

- обмеження напруги дотику та кроку до безпечних значень;
- надійне відведення струму замикання на землю;
- вирівнювання потенціалів між металевими конструкціями;
- електричний зв'язок між усіма елементами обладнання і

заземлювальною сіткою [12].

До заземлювального контуру приєднуються:

- металоконструкції опор і порталів;
- баки та основи апаратів;
- приводи вимикачів і роз'єднувачів;
- шафи релейного захисту та вторинних кіл;
- грозозахисні троси, блискавковідводи, опорні конструкції.

Розрахункова оцінка опору заземлювального пристрою

Для попередньої оцінки ефективності заземлювача можна використати спрощену залежність:

$$R_3 = \frac{\rho}{4L}$$

де R_3 – опір заземлювального пристрою, Ом; ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м; L – сумарна довжина горизонтальних заземлювачів, м.

Приймаємо: питомий опір ґрунту $\rho=100$ Ом·м, сумарна довжина горизонтальних заземлювачів $L=200$ м. Тоді: $R_3=100/(4 \cdot 200)=100/800=0.125$ Ом.

Отримане значення свідчить, що заземлювальний пристрій має достатньо малий опір і забезпечує ефективне відведення струмів у землю (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Вихідні дані для оцінки опору заземлення

Параметр	Позначення	Значення
Питомий опір грунту, Ом·м	ρ	100
Сумарна довжина горизонтальних провідників, м	L	200
Опір заземлення, Ом	R_3	0,125

На практиці точний розрахунок заземлення виконується з урахуванням конфігурації сітки, глибини прокладання, сезонних змін вологості ґрунту, вертикальних електродів, а також умов напруги дотику і кроку [12]. У межах бакалаврської роботи наведена оцінка підтверджує доцільність застосування сітчастого контуру заземлення для ВРП 220 кВ.

Конструктивне виконання заземлювального пристрою

Для ВРП 220 кВ доцільно застосовувати сітчастий заземлювальний пристрій, який складається з (табл. 4.8): горизонтальних сталевих смуг, прокладених у ґрунті; вертикальних електродів у вузлових точках; приєднувальних відгалужень до основного обладнання; додаткового вирівнювання потенціалів у місцях постійного перебування персоналу.

Таблиця 4.8 – Основні елементи системи заземлення ВРП 220 кВ

Елемент	Призначення
Горизонтальні заземлювачі	Формування сітки заземлення
Вертикальні електроди	Зменшення опору розтікання
З'єднувальні провідники	Приєднання обладнання до заземлення
Контур вирівнювання потенціалів	Зменшення напруги дотику і кроку

Грозозахист ВРП 220 кВ

Відкриті розподільчі пристрої мають значну площу і висоту окремих конструкцій, тому є вразливими до прямих ударів блискавки. Для захисту обладнання застосовуються:

- окремо встановлені блискавковідводи;
- блискавкоприймальні троси;
- приєднання блискавкозахисту до заземлювального пристрою;
- обмежувачі перенапруг на приєднаннях і шинах [5, 13].

Основне завдання системи грозозахисту полягає у створенні захисної зони, всередині якої розміщується основне обладнання ВРП. Під час вибору розташування блискавковідводів враховуються геометричні розміри майданчика, висота апаратів, відстані між порталами та вимоги до надійності захисту [13].

Для попередньої оцінки можна прийняти, що окремо встановлений стрижневий блискавковідвід висотою $h=25$ м створює зону захисту, достатню для більшості елементів ВРП, розташованих на висоті до 10–12 м. У практичному проектуванні захисна зона уточнюється відповідно до прийнятого методу розрахунку згідно з вимогами стандарту ІЕС 62305-1 [13].

Основні елементи системи грозозахисту ВРП 220 кВ наведено в табл. 4.9.

Заходи електробезпеки при експлуатації ВРП 220 кВ

Безпечна експлуатація ВРП 220 кВ передбачає:

- наявність надійного захисного заземлення;
- виконання оперативних перемикань відповідно до інструкцій;
- використання засобів індивідуального захисту;
- блокування неправильних операцій із роз'єднувачами та заземлювальними ножами;
- регулярну перевірку стану заземлювальних з'єднань і грозозахисних елементів [12].

Зазначені заходи дозволяють підвищити безпеку оперативного та ремонтного персоналу, а також знизити ризик пошкодження обладнання у випадку грозових явищ і замикань на землю.

Таблиця 4.9 – Основні елементи системи грозозахисту ВРП 220 кВ

Елемент	Призначення
Стрижневий блискавковідвід	Перехоплення прямих ударів блискавки
Блискавкоприймальний трос	Захист шин і відкритих струмопровідних частин
ОПН	Захист від імпульсних перенапруг
Заземлювальний пристрій	Відведення імпульсного струму в землю

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У розділі наведено технічні характеристики обладнання, обраного для модернізації ВРП 220 кВ, а саме елегазового вимикача, роз'єднувача, трансформатора струму, трансформатора напруги та обмежувача перенапруг. Показано, що прийняті апарати відповідають умовам роботи у високовольтній мережі, мають достатні номінальні параметри та забезпечують підвищення надійності експлуатації відкритого розподільчого пристрою.

Виконано попередню оцінку заземлювального пристрою та встановлено, що сітчастий контур заземлення є доцільним технічним рішенням для ВРП 220 кВ. Розглянуто основні принципи побудови системи грозозахисту, яка повинна включати блискавковідводи, заземлювальні з'єднання та обмежувачі перенапруг.

Отже, технічне забезпечення, заземлення та грозозахист є невід'ємними складовими модернізації ВРП 220 кВ, оскільки саме вони формують необхідний рівень надійності, електробезпеки й захисту обладнання від аварійних та атмосферних впливів.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВРП 220 кВ

5.1 Заходи з охорони праці під час експлуатації та модернізації ВРП 220 кВ

Експлуатація та модернізація відкритого розподільчого пристрою 220 кВ належать до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язані з наявністю високої напруги, значних електродинамічних навантажень, відкритого розміщення обладнання та необхідністю виконання монтажних і налагоджувальних операцій у діючій електроустановці. Тому забезпечення належного рівня охорони праці є обов'язковою умовою безпечної роботи персоналу, запобігання нещасним випадкам і зниження ризику аварійних ситуацій [12, 22, 23].

Під час експлуатації та модернізації ВРП 220 кВ на працівників можуть впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

- ураження електричним струмом у разі випадкового дотику до струмовідних частин;
- термічний вплив електричної дуги;
- дія електромагнітного поля;
- падіння з висоти під час монтажу або демонтажу обладнання;
- травмування внаслідок переміщення важких елементів конструкцій;
- вплив несприятливих погодних умов під час робіт на відкритому повітрі;
- психофізіологічне перевантаження при виконанні оперативних або аварійно-відновлювальних робіт.

Найбільшу небезпеку у відкритих розподільчих пристроях становить висока напруга, тому одним із головних напрямів забезпечення безпеки є правильна організація електробезпеки. Усі роботи на обладнанні ВРП 220 кВ мають виконуватися лише після проведення необхідних організаційних і технічних заходів: оформлення наряду-допуску, відключення обладнання, перевірки відсутності напруги, встановлення переносних заземлень,

вивішування заборонних та попереджувальних плакатів, а також огороження робочого місця [12].

До виконання робіт допускаються лише працівники, які пройшли медичний огляд, вступний і первинний інструктаж, перевірку знань з охорони праці та мають відповідну групу з електробезпеки. Персонал, який виконує оперативні перемикання або бере участь у монтажі й налагодженні обладнання 220 кВ, повинен знати схему електроустановки, розташування комутаційної апаратури, призначення захисних пристроїв і порядок дій у разі аварії.

Під час роботи у ВРП 220 кВ обов'язковим є застосування засобів індивідуального захисту. До них належать:

- каска захисна;
- діелектричні рукавички;
- діелектричне взуття;
- захисний одяг;
- інструмент з ізольованими ручками;
- переносні заземлення;
- покажчики напруги;
- запобіжні пояси та страхувальні пристрої для робіт на висоті.

При модернізації ВРП 220 кВ значна частина операцій пов'язана з демонтажем старого обладнання та встановленням нового. Такі роботи повинні виконуватися механізованим способом із використанням справного вантажопідіймального обладнання. Перед початком монтажу необхідно перевірити стійкість опорних конструкцій, справність стропів, траверс, такелажних пристроїв і наявність безпечних проходів до місця роботи. Забороняється перебування працівників у зоні переміщення вантажів.

Особливої уваги потребують роботи на висоті, які виникають під час заміни роз'єднувачів, трансформаторів струму, трансформаторів напруги, обмежувачів перенапруг та монтажу **ошиновки**. Такі роботи повинні виконуватися з використанням підйомників, риштувань або інвентарних площадок, а працівники мають бути забезпечені запобіжними поясами та

страхувальними канатами. Роботи на висоті забороняється проводити під час грози, ожеледиці, сильного вітру або зливи.

Важливим складником безпеки є надійне функціонування системи захисного заземлення. Усі металеві неструмовідні частини обладнання, рами апаратів, приводи, шафи вторинних кіл, металоконструкції та блискавкозахисні елементи мають бути приєднані до спільного заземлювального пристрою. Це забезпечує зниження напруги дотику та кроку до безпечного рівня і зменшує ризик ураження персоналу електричним струмом [12, 13].

Оскільки модернізація передбачає застосування сучасних елегазових вимикачів, необхідно також враховувати вимоги безпеки під час поводження з обладнанням, що містить SF₆. Під час технічного обслуговування й контролю такого обладнання слід перевіряти герметичність полюсів, стан реле щільності газу та справність систем сигналізації. У разі проведення регламентних робіт повинні використовуватися технологічні заходи, що виключають безконтрольний витік газу в навколишнє середовище.

Протипожежна безпека у ВРП 220 кВ забезпечується розміщенням первинних засобів пожежогасіння [22, 23], дотриманням правил утримання кабельних трас, заборонаю використання відкритого вогню та своєчасним видаленням горючих матеріалів із робочої зони. У місцях проведення монтажних робіт повинні бути доступними порошкові або вуглекислотні вогнегасники [24].

Таким чином, безпечна експлуатація та модернізація ВРП 220 кВ забезпечуються сукупністю організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на зниження професійних ризиків, запобігання аваріям та створення безпечних умов праці для оперативного й ремонтного персоналу.

5.2 Екологічна безпека проєктного рішення

Модернізація відкритого розподільчого пристрою 220 кВ повинна оцінюватися не лише з позиції технічної ефективності, а й з погляду екологічної безпеки. Хоча сама модернізація не супроводжується зміною основного виду діяльності енергооб'єкта, вона впливає на рівень техногенного навантаження,

обсяги експлуатаційних відходів, ризики аварійних витоків робочих середовищ та загальний рівень безпечності функціонування електроустановки.

У процесі тривалої експлуатації застарілого обладнання ВРП 220 кВ можуть виникати такі екологічні ризики:

- погіршення герметичності апаратів;
- старіння ізоляційних і ущільнювальних матеріалів;
- підвищення ймовірності аварійного пошкодження обладнання;
- збільшення кількості відходів під час ремонтів;
- ризик забруднення території у разі витoku ізоляційного масла або

руйнування окремих елементів апаратів.

Запропоноване проєктне рішення передбачає використання сучасного високовольтного обладнання, яке має вищу герметичність, більший ресурс роботи та потребує меншої кількості втручань у процесі експлуатації. Це сприяє зменшенню експлуатаційних витрат, скороченню кількості ремонтних відходів і підвищенню екологічної надійності об'єкта [1–5].

Позитивний екологічний ефект модернізації проявляється в кількох напрямках. По-перше, нове обладнання забезпечує нижчу ймовірність аварійних відмов, а отже, зменшує ризик пошкодження ізоляції, виникнення вторинних коротких замикань і локального забруднення території. По-друге, зменшення обсягу ремонтних робіт приводить до скорочення споживання допоміжних матеріалів і кількості списаних елементів. По-третє, застосування сучасних обмежувачів перенапруг та надійнішої комутаційної апаратури сприяє підвищенню ресурсу інших елементів ВРП, що також має позитивний ресурсозберігальний ефект.

Окремої уваги потребує питання поводження з демонтованим обладнанням. Під час виконання модернізації всі зняті апарати, металеві конструкції, ізоляційні деталі, кабельна продукція та інші матеріали повинні сортуватися за видами відходів і передаватися на подальшу утилізацію або спеціалізовану переробку відповідно до чинних екологічних і технічних вимог. Особливо це стосується обладнання, що містить ізоляційне масло,

ущільнювальні матеріали або інші речовини, які підлягають контрольованому вилученню та зберіганню.

У разі застосування елегазових вимикачів важливим екологічним аспектом є контроль герметичності обладнання та недопущення витоків SF₆. Тому в межах проєкту необхідно передбачити періодичний контроль щільності газу, ведення експлуатаційного обліку, дотримання регламентів технічного обслуговування та використання технологій, що мінімізують можливі втрати робочого середовища.

Суттєвим позитивним наслідком модернізації є підвищення надійності електропостачання і зниження ймовірності аварій, які можуть супроводжуватися пошкодженням обладнання, локальним задимленням, утворенням відходів або додатковими ремонтними роботами. Таким чином, модернізація ВРП 220 кВ має не лише технічне, а й екологічне значення, оскільки сприяє більш безпечній, контрольованій і ресурсоефективній експлуатації електроустановки.

Отже, проєктне рішення щодо модернізації ВРП 220 кВ можна вважати екологічно доцільним. Воно не призводить до збільшення екологічного навантаження на довкілля, а навпаки, сприяє зниженню ризиків, пов'язаних із відмовами застарілого обладнання, та забезпечує більш раціональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів.

5.3 Економічна ефективність модернізації ВРП 220 кВ

Економічне обґрунтування модернізації ВРП 220 кВ є необхідним етапом бакалаврської роботи, оскільки дає змогу оцінити доцільність запровадження запропонованого технічного рішення не лише з інженерної, а й з фінансово-економічної точки зору. Ефективність проєкту визначається насамперед зниженням експлуатаційних витрат, скороченням витрат на ремонт, зменшенням витрат електроенергії та підвищенням надійності роботи електроустановки.

У результаті модернізації передбачається заміна застарілої комутаційної апаратури, вимірювальних трансформаторів та обмежувачів перенапруг на сучасне обладнання з вищим технічним ресурсом і кращими експлуатаційними характеристиками. Це дозволяє зменшити витрати на планово-попереджувальні

ремонти, скоротити кількість аварійних відмов і знизити трудомісткість технічного обслуговування.

Для попередньої економічної оцінки приймаємо структуру капітальних витрат, наведену в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Структура витрат на реалізацію проекту модернізації ВРП 220 кВ

Найменування витрат	Сума, тис. грн
Закупівля нового електрообладнання	4800
Монтажні та пусконаладжувальні роботи	1000
Демонтаж існуючого обладнання	400
Транспортні та логістичні витрати	250
Технічна експертиза, навчання персоналу	150
Разом капітальні витрати	6600

Основні економічні результати від модернізації формуються за рахунок таких складових:

- скорочення витрат на технічне обслуговування;
- зменшення витрат на поточний і аварійний ремонт;
- зниження витрат електроенергії в апаратах і контактних з'єднаннях;
- зменшення збитків від аварійних вимкнень та простоїв.

Для розрахунку річного економічного ефекту прийmemo такі значення:

- зниження витрат на технічне обслуговування – 400 тис. грн/рік;
- економія від зменшення витрат електроенергії – 980 тис. грн/рік;
- зниження збитків від аварійних ситуацій – 350 тис. грн/рік;

- скорочення витрат на ремонт – 300 тис. грн/рік.

Тоді загальна річна економія становитиме: $E_{\text{річна}}=2030$ тис. грн/рік

Термін окупності проєкту визначається за формулою:

$$T=C_{\text{інв}}/E_{\text{річна}}$$

де $C_{\text{інв}}$ – загальні капітальні вкладення, тис. грн;
 $E_{\text{річна}}$ – річний економічний ефект, тис. грн/рік.

Підставляючи числові значення, отримаємо: $T=6600/2030\approx 3.25$ роки.

Основні показники економічної ефективності представлено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Основні показники економічної ефективності

Показник	Значення
Загальні капітальні витрати, тис. грн	6600
Річна економія на технічному обслуговуванні, тис. грн	400
Річна економія від зменшення втрат електроенергії, тис. грн	980
Зниження аварійних збитків, тис. грн	350
Зниження ремонтних витрат, тис. грн	300
Загальний річний економічний ефект, тис. грн/рік	2030
Термін окупності, років	3,25

Отриманий термін окупності свідчить, що модернізація ВРП 220 кВ є економічно доцільною. Для об'єктів енергетичної інфраструктури інвестиції з окупністю на рівні близько трьох-чотирьох років вважаються прийнятними,

особливо якщо паралельно досягається підвищення надійності, безпеки та експлуатаційної стійкості.

Крім прямого економічного ефекту, модернізація забезпечує також непрямі переваги, які складно точно оцінити у грошовому вираженні, але вони мають важливе практичне значення. До них належать:

- підвищення якості оперативного керування;
- покращення умов праці персоналу;
- зниження ризику аварійних пошкоджень суміжного обладнання;
- підвищення загальної технічної культури експлуатації ВРП.

Таким чином, запропоноване проєктне рішення щодо модернізації відкритого розподільчого пристрою 220 кВ є не лише технічно обґрунтованим, а й економічно ефективним, оскільки забезпечує реальне скорочення витрат і підвищення надійності функціонування електроенергетичного об'єкта.

Висновки до розділу 5

У розділі розглянуто питання охорони праці, екологічної безпеки та економічної ефективності модернізації ВРП 220 кВ. Встановлено, що роботи з експлуатації та оновлення відкритого розподільчого пристрою належать до категорії підвищеної небезпеки, тому їх виконання повинно супроводжуватися комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на захист персоналу від ураження електричним струмом, дії електричної дуги, падіння з висоти та інших виробничих ризиків.

Показано, що модернізація ВРП 220 кВ має позитивний вплив на екологічну безпеку об'єкта, оскільки сприяє зменшенню імовірності аварійних пошкоджень, скороченню обсягів ремонтних відходів та більш раціональному використанню обладнання і матеріалів. За умови дотримання вимог до утилізації демонтованих елементів і контролю герметичності сучасних апаратів проєктне рішення є екологічно доцільним.

Економічний аналіз показав, що модернізація ВРП 220 кВ забезпечує щорічний економічний ефект за рахунок зниження витрат на технічне обслуговування, ремонт, компенсацію аварійних відмов і втрат електроенергії. Розрахований термін окупності становить близько 3,25 роки, що підтверджує економічну доцільність запропонованого технічного рішення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розв'язано актуальне технічне завдання, що полягає в обґрунтуванні та розробленні рішень щодо модернізації електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ з метою підвищення надійності, безпеки та ефективності його функціонування. Встановлено, що тривала експлуатація високовольного обладнання без належного оновлення призводить до фізичного і морального старіння основних елементів електроустановки, зниження експлуатаційної надійності, збільшення обсягів технічного обслуговування та ускладнення забезпечення нормативного рівня безпеки.

1. Встановлено, що модернізація ВРП 220 кВ повинна мати комплексний характер і охоплювати не лише заміну окремих апаратів, а й удосконалення загальної структури електроустановки, її захисних систем, заземлення, грозозахисту та засобів контролю технічного стану. Такий підхід дає змогу забезпечити узгоджену роботу всіх елементів розподільчого пристрою в нормальних і аварійних режимах.

2. Обґрунтовано доцільність застосування сучасного високовольного обладнання, характеристики якого відповідають вимогам до роботи в мережах класу напруги 220 кВ. Встановлено, що вибрані технічні рішення забезпечують необхідний рівень термічної та електродинамічної стійкості, належну комутаційну здатність, надійність функціонування та можливість подальшої інтеграції з сучасними системами релейного захисту, автоматики і моніторингу.

3. Доведено, що важливою умовою безпечної експлуатації модернізованого ВРП 220 кВ є ефективне функціонування системи захисного заземлення та грозозахисту. Реалізація відповідних технічних заходів дозволяє зменшити ризик ураження персоналу електричним струмом, підвищити стійкість електрообладнання до атмосферних і комутаційних перенапруг, а також забезпечити належний рівень електробезпеки під час експлуатації та проведення ремонтних робіт.

4. Визначено, що модернізація відкритого розподільчого пристрою 220 кВ має позитивне значення не лише з технічної, а й з екологічної точки зору, оскільки сприяє зниженню ризику аварійних ситуацій, скороченню кількості ремонтних відходів, підвищенню герметичності сучасних апаратів та більш раціональному використанню матеріальних і енергетичних ресурсів.

5. Економічна оцінка підтвердила доцільність упровадження запропонованого проєктного рішення. Очікуване зниження витрат на технічне обслуговування, ремонт, компенсацію аварійних відмов і втрат електроенергії свідчить про наявність реального економічного ефекту від модернізації. Це дає підстави вважати запропоновані технічні рішення не лише інженерно обґрунтованими, а й економічно ефективними.

6. Запропоновані рішення щодо модернізації електрообладнання відкритого розподільчого пристрою 220 кВ забезпечують підвищення надійності та безпеки роботи електроустановки, покращення умов її експлуатації, зниження аварійності та відповідність сучасним технічним вимогам. Отримані результати можуть бути використані під час подальшого оновлення високовольтного обладнання на енергетичних об'єктах аналогічного призначення.