

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: «Релейний захист енергетичного обладнання підприємства»

КРБ.14ЕЕбд_21[2].01.00.00.000 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_21[2]*
ГОРОШКО Юрій

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

Полтава – 2025 року

ВСТУП

У сучасних умовах зростання енергоспоживання та ускладнення виробничих процесів системи електропостачання підприємств перетворилися на складні об'єкти, які функціонують за принципами кібернетичних систем. Усі складові таких систем беруть участь у спільному технологічному процесі, для якого характерні динамічні зміни режимів роботи та висока ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Забезпечення безперебійної, надійної та економічно ефективної роботи електропостачання можливе лише за умови широкого впровадження автоматизованих засобів керування і захисту.

Ключову роль у системах автоматичного контролю відіграють пристрої релейного захисту та автоматики. Вони забезпечують своєчасне виявлення та ізоляцію пошкоджених ділянок мережі, запобігаючи розповсюдженню аварій та знижуючи ризик пошкодження обладнання. З розвитком електроенергетики постає необхідність постійного вдосконалення цих пристроїв, зокрема впровадження мікропроцесорних технологій та цифрових систем релейного захисту [1].

У практиці проєктування систем електропостачання, поряд із впровадженням складних автоматизованих комплексів, також широко застосовуються прості елементи захисту – автоматичні вимикачі, електромагнітні пускачі, електромагнітні реле, трансформатори струму, пристрої живлення змінного оперативного струму тощо.

У межах даної бакалаврської роботи виконано комплексне проєктування головної понижувальної підстанції (ГПП) підприємства, що включає розробку її принципової схеми, вибір електрообладнання та кабельних ліній, розрахунок параметрів пристроїв релейного захисту та автоматики з обґрунтуванням їх уставок. Отримані результати спрямовані на підвищення надійності та енергоефективності електропостачання промислового об'єкта.

Мета роботи – підвищення надійності та ефективності електропостачання споживачів шляхом проєктування та техніко-економічного обґрунтування

впровадження системи релейного захисту і автоматики на головній понижувальній підстанції напругою 35/10 кВ.

Об'єкт розробки – головна понижувальна підстанція (ГПП) 35/10 кВ, що забезпечує електроживлення промислових та агропромислових підприємств.

Предмет розробки – система релейного захисту та автоматики для повітряних ліній і обладнання ГПП 35/10 кВ, включаючи розрахунок струмів короткого замикання, вибір захисних пристроїв та оцінку їх ефективності.

Методика досліджень – комплексний аналіз роботи підстанції на основі нормативної документації, використання методів розрахунку струмів короткого замикання, визначення параметрів електричних елементів, комп'ютерного моделювання, а також техніко-економічного й екологічного обґрунтування впроваджених рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: провести аналіз сучасного стану та класифікації систем релейного захисту, визначити їх переваги та недоліки; охарактеризувати структуру та електротехнічне обладнання головної понижувальної підстанції 35/10 кВ; побудувати однолінійну схему підстанції, визначити параметри її основних елементів; провести розрахунок струмів короткого замикання у ключових точках електричної мережі; розробити та обґрунтувати параметри захисту повітряних ліній та обладнання 35 кВ; визначити заходи з охорони праці при експлуатації систем релейного захисту; провести екологічну експертизу проєктного рішення; виконати розрахунок економічної ефективності впровадження запропонованої системи.

Практична значимість та реалізація досліджень. Результати роботи можуть бути використані в практиці проєктування та модернізації головних понижувальних підстанцій, особливо на об'єктах агропромислового комплексу. Запропонована система релейного захисту сприяє підвищенню надійності, скороченню часу ліквідації аварійних ситуацій, мінімізації втрат електроенергії та забезпеченню екологічної безпеки об'єкта. Економічний розрахунок доводить доцільність інвестування в систему захисту з терміном окупності близько трьох років.

1 СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд сучасних систем релейного захисту: переваги та недоліки

У сучасних умовах зростаючого навантаження на енергетичну систему, розвитку відновлюваних джерел енергії, автоматизації електромереж і цифрової трансформації енергетики надзвичайно важливою залишається проблема забезпечення надійності електропостачання. Одним із головних інструментів, що гарантує безпечну та безперебійну роботу енергосистем, є релейний захист. Цей захист не лише локалізує аварійні ділянки, а й захищає персонал і споживачів від наслідків пошкоджень в електрообладнанні [1, 2].

Перші релейні пристрої з'явилися на початку XX століття разом із розвитком електричних мереж. Початково це були електромеханічні реле, які базувались на електромагнітних принципах. Вони довгий час залишались основним типом захисту і відзначались простотою та високою надійністю, але обмеженою чутливістю і точністю.

З 1960-х років з розвитком електроніки з'явилися електронні (напівпровідникові) реле, які дозволили зменшити розміри захисту, підвищити швидкодію і точність, але мали меншу стійкість до перешкод і обмежені можливості переналаштування.

Починаючи з 1980-х років, особливо після розвитку мікропроцесорної техніки, в енергетиці активно почали впроваджуватись цифрові (мікропроцесорні) пристрої релейного захисту, які сьогодні є домінуючим типом у нових і модернізованих енергооб'єктах.

В таблиці 1.1 здійснена класифікація систем релейного захисту [1].

Розглянемо сучасну структуру та функції мікропроцесорних систем. Мікропроцесорний релейний захист складається з таких основних блоків:

- вхідні перетворювачі: приймають сигнали струму, напруги та частоти.
- аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП): переводять аналогові сигнали в цифрові.

- мікропроцесор: обробляє сигнали за певними алгоритмами, виявляє аварії, приймає рішення.
- інтерфейси обміну: передають інформацію до диспетчерської, архівують дані, підтримують протоколи зв'язку (Modbus, IEC 61850 тощо).
- виконавчі реле: реалізують фізичне відключення обладнання.

Сучасні реле поєднують у собі функції захисту, автоматики, контролю, реєстрації аварій та зв'язку в одному компактному пристрої.

Мікропроцесорний релейний захист складається з таких основних блоків [2]:

- Вхідні перетворювачі: приймають сигнали струму, напруги та частоти.
- Аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП): переводять аналогові сигнали в цифрові.
- Мікропроцесор: обробляє сигнали за певними алгоритмами, виявляє аварії, приймає рішення.
- Інтерфейси обміну: передають інформацію до диспетчерської, архівують дані, підтримують протоколи зв'язку (Modbus, IEC 61850 тощо).
- Виконавчі реле: реалізують фізичне відключення обладнання.

Сучасні реле поєднують у собі функції захисту, автоматики, контролю, реєстрації аварій та зв'язку в одному компактному пристрої [3, 4].

1.2. Техніко-функціональний аналіз цифрових систем релейного захисту

Технічні переваги:

- Швидкодія до 10-20 мс.
- Висока точність спрацювання.
- Можливість селективного налаштування (відсічення саме аварійної ділянки).
- Вбудовані алгоритми компенсації помилок і самодіагностики.

Функціональні переваги:

- Інтеграція із системами автоматизації, SCADA, АСКОЕ.
- Можливість оновлення прошивки та програмної логіки.
- Наявність графічного інтерфейсу, архівів, протоколів подій.
- Ведення реєстрації струмів, напруг, аварійних подій із часовими мітками.

Практичні переваги:

- Зменшення витрат на обслуговування.
- Підвищення енергоефективності системи за рахунок запобігання аваріям.
- Віддалене керування та діагностика (особливо актуально для складних об'єктів).

Недоліки та ризики впровадження

Хоча мікропроцесорні системи мають багато переваг, існують і обмеження:

- Ціна: первинні інвестиції значно вищі, особливо для малих підприємств.
- Підготовка персоналу: обслуговування вимагає спеціальних знань і навичок.
- Потенційні програмні помилки: людський фактор на етапі налаштування або оновлення прошивки.
- Вразливість до кіберзагроз: цифрові пристрої потребують серйозного захисту від хакерських атак.

Приклади застосування

1. Вітрові електростанції: релейний захист контролює перевантаження, асиметрію, зниження напруги, автоматичне відключення секцій при аваріях.
2. Підстанції 110/35/10 кВ: використання цифрових реле від Siemens, ABB, Schneider Electric для комплексного захисту трансформаторів, шин, ліній, АВР.
3. Об'єкти АПК: системи релейного захисту використовуються для захисту насосних станцій, зерносушарок, електроприводів технологічних агрегатів.

Міжнародні стандарти і розвиток

Цифровий релейний захист активно розвивається в рамках:

- IEC 61850 — стандарт цифрового обміну між пристроями підстанцій [3].
- IEC 60255 — вимоги до реле загального призначення [4].
- IEEE C37 — стандарт для пристроїв цифрового релейного захисту в США.

Важливою тенденцією є впровадження інтелектуальних систем релейного захисту з підтримкою штучного інтелекту, які здатні адаптуватись до змін режимів мережі, аналізувати тренди та прогнозувати потенційні збої.

Сучасні системи релейного захисту - це основа надійної та безпечної експлуатації енергетичних об'єктів. Вони здатні забезпечити гнучке, точне та оперативне реагування на аварійні ситуації, знижуючи ризики пошкодження обладнання та перебоїв у постачанні електроенергії. Попри деякі недоліки, переваги цифрових систем значно перевершують їх, що підтверджується широким впровадженням на підприємствах. У найближчому майбутньому релейний захист розвиватиметься у напрямі повної цифровізації, інтеграції з IoT та Smart Grid, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності енергосистем [1].

Висновки до розділу 1

У цьому розділі було проведено детальний аналіз етапів розвитку та класифікації систем релейного захисту, розглянуто принципи їх роботи, переваги та недоліки. Релейний захист є критично важливою складовою електроенергетичних систем, що забезпечує своєчасне виявлення та локалізацію аварійних ситуацій для мінімізації пошкоджень і забезпечення надійного електропостачання.

У процесі еволюції систем релейного захисту від електромеханічних до мікропроцесорних спостерігається чітка тенденція до підвищення швидкодії, точності та функціональної гнучкості. Сучасні цифрові пристрої релейного захисту мають широкий функціонал, здатні інтегруватися із системами SCADA, автоматизовано реєструвати події та вести обмін даними за міжнародними протоколами.

До ключових переваг мікропроцесорного релейного захисту слід віднести: швидкодію, високу точність, можливість самодіагностики, багатофункціональність, зменшення витрат на обслуговування та можливість дистанційного моніторингу. Водночас його використання супроводжується певними викликами — високою вартістю впровадження, необхідністю підготовки кваліфікованого персоналу та ризиками кіберзагроз.

Проаналізовано також приклади впровадження сучасного релейного захисту на вітрових електростанціях, підстанціях і об'єктах агропромислового комплексу, що підтверджує його універсальність і адаптивність до різних умов експлуатації. Актуальними напрямками розвитку є впровадження інтелектуальних систем із використанням штучного інтелекту та стандартів цифрової взаємодії, таких як IEC 61850.

Сучасні системи релейного захисту відіграють ключову роль у підвищенні надійності, безпеки та ефективності роботи електроенергетичних об'єктів і мають значний потенціал подальшого розвитку в контексті цифрової трансформації енергетики.

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЙОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СКЛАДОВА

2.1 Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження в даній роботі є головна понижувальна підстанція (ГПП) з рівнем напруги 35/10 кВ, яка призначена для забезпечення електроживлення споживачів промислового або агропромислового призначення. Такі підстанції мають стратегічне значення в структурі енергосистем, адже вони забезпечують надійне та стабільне постачання електроенергії до об'єктів з великим електричним навантаженням, у тому числі цехів, насосних станцій, зерносушильних комплексів, елеваторів, фермерських господарств тощо [6].

Головною функцією таких підстанцій є перетворення електроенергії з високої напруги (35 кВ), яка надходить із магістральних ліній електропередач, на середню напругу (10 кВ), що вже безпосередньо розподіляється до споживачів. Це дозволяє ефективно інтегрувати регіональні енергосистеми з локальними мережами підприємств, забезпечуючи мінімальні втрати електроенергії під час транспортування.

У даній роботі дослідження зосереджено на детальному аналізі структури електричних схем підстанції, особливостях побудови релейного захисту, організації ланцюгів оперативного струму та застосуванні сучасних мікропроцесорних пристроїв у системах автоматизованого керування та захисту електрообладнання [6]. Особлива увага приділяється аналізу схем живлення, надійності роботи обладнання в умовах аварій, а також оптимізації процесів технічного обслуговування.

Призначення та особливості роботи підстанції [7]

Головна понижувальна підстанція виконує ряд критично важливих функцій [8]:

- Прийом електроенергії з боку високої напруги (ВН) 35 кВ через повітряні або кабельні лінії.

- Зниження напруги до середнього рівня 10 кВ за допомогою силових трансформаторів номінальною потужністю 6,3 МВА кожен.
- Розподіл електроенергії споживачам по шинній системі середньої напруги, відповідно до структури електромережі підприємства.
- Захист елементів мережі від пошкоджень, зокрема коротких замикань, перевантажень, замикань на землю тощо.
- Забезпечення безпеки персоналу, який обслуговує енергетичне обладнання, через наявність швидкодійних систем аварійного вимкнення.

Крім основного функціоналу, підстанція виконує і системоутворюючу роль у мережі, з'єднуючи магістральні лінії з локальними електричними мережами підприємства. Її правильна робота є запорукою енергоефективного, надійного та безпечного електропостачання.

Електротехнічне обладнання підстанції

До складу головної понижувальної підстанції входить наступне основне електротехнічне обладнання [8, 9]:

- Силові трансформатори типу ТМГ або ТМ, які забезпечують необхідне зниження рівня напруги з 35 кВ до 10 кВ, адаптуючи її до потреб кінцевих споживачів.
- Вакуумні вимикачі типу ВР35НС-35-20/1600 У1 (для сторони 35 кВ) та ВВ/TEL–10 (для сторони 10 кВ), що виконують комутаційні операції, а також автоматично вимикають пошкоджені ділянки у випадку аварійних ситуацій.
- Розподільчі пристрої, які можуть бути як зовнішнього (на відкритому повітрі), так і внутрішнього (у закритих приміщеннях) виконання, залежно від кліматичних умов експлуатації.
- Мікропроцесорні реле захисту, які автоматизовано аналізують параметри електромережі та приймають рішення про аварійне відключення з високою швидкістю та точністю.
- Шафа оперативного постійного струму (ШОТ-01), яка забезпечує живлення ланцюгів керування, сигналізації та захисту навіть у разі зникнення основного живлення, завдяки акумуляторній батареї та двом незалежним каналам підзарядки.

Обґрунтування вибору об'єкта дослідження

Вибір підстанції 35/10 кВ як об'єкта дослідження зумовлений її широким застосуванням в енергетичному забезпеченні підприємств різного профілю, особливо в умовах агропромислового комплексу. Такі підстанції є універсальними, дозволяють інтегрувати інтелектуальні системи автоматизації, оптимізувати роботу підприємств та покращити надійність електропостачання. Дослідження роботи підстанції дозволяє на практиці розглянути ефективність реалізації систем релейного захисту, впровадження цифрових протоколів (IEC 61850), аналізу ефективності схем оперативного струму, а також моделювання поведінки системи в аварійних умовах.

2.2 Розробка однолінійної схеми головної понижувальної підстанції (ГПП)

Однолінійну схему головної понижувальної підстанції 35/10 кВ розроблено на основі типового варіанту, запропонованого у [8].

2.3 Організація оперативних ланцюгів постійного струму

На проектуваній підстанції передбачається встановлення вакуумних вимикачів на обох сторонах – високій (35 кВ) та низькій (10 кВ) напруги [9].

На стороні 35 кВ застосовано вакуумні вимикачі типу ВР35НС-35-20/1600 У1 з такими параметрами: номінальна напруга – 35 кВ, максимальна робоча – 40,5 кВ, номінальний струм – 1600 А, частота – 50 Гц, струм відключення – 20 кА. Вторинні ланцюги вимикачів мають такі характеристики: номінальна напруга електромагніту (YA1) при живленні постійним струмом – 220 В, як і напруга керуючих ланцюгів (КСТ, КСС). Максимальне значення струму, що споживається електромагнітом під час вмикання та вимикання – до 10 А.

На стороні 10 кВ встановлено вакуумні вимикачі серії ВВ/TEL – 10. Їх основні характеристики: номінальна напруга – 10 кВ, гранична робоча – 12 кВ,

номінальний струм – 630 А, струм відключення – 20 кА. Струм споживання електромагнітів керування при 220 В не перевищує 5 А.

Для живлення ланцюгів керування використовується оперативний постійний струм. Завдяки невеликому рівню споживання вакуумними вимикачами, в якості джерела живлення обрано шафу оперативного постійного струму типу ШОТ-01-50 з номінальною напругою 220 В (рисунок 2.2).

Шафа оснащена акумуляторною батареєю ємністю 50 А·год та двома зарядними пристроями, які отримують живлення від окремих незалежних секцій власних потреб напругою 0,4 кВ. Ці секції, в свою чергу, живляться через трансформатори власних потреб 35/0,4 кВ, що приєднані до ліній 35 кВ.

У штатному режимі обидва зарядні пристрої працюють одночасно, забезпечуючи безперервне заряджання акумуляторної батареї. За наявності напруги хоча б на одній секції власних потреб, шини керування і сигналізації живляться від зарядних пристроїв. Якщо живлення відсутнє на обох секціях, живлення автоматично переходить на акумуляторну батарею. Конструкція дозволяє паралельну роботу обох зарядних пристроїв із рівномірним розподілом навантаження [9].

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено комплексний аналіз об'єкта дослідження — головної понижувальної підстанції (ГПП) напругою 35/10 кВ, що відіграє ключову роль у системі електропостачання промислових та агропромислових підприємств. Встановлено, що підстанція забезпечує ефективну трансформацію напруги з магістрального рівня до споживчого, що дозволяє забезпечити надійне та стабільне живлення технологічного обладнання підприємств.

Описано функціональні та технічні особливості підстанції, включаючи її роль як вузлового елемента в енергосистемі. Детально охарактеризовано електротехнічне обладнання, зокрема трансформатори, вакуумні вимикачі, мікропроцесорні реле захисту та систему оперативного постійного струму.

У процесі розробки однолінійної схеми підстанції було обґрунтовано вибір двох силових трансформаторів по 6,3 МВА, що відповідає типовим вимогам до електропостачання середніх об'єктів. Окрема увага приділена організації ланцюгів оперативного струму, де використано шафу ШОТ-01-50 із подвійним джерелом підзарядки, що гарантує безперебійність керування та захисту навіть у разі відмови основного живлення.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність вибору підстанції 35/10 кВ як об'єкта дослідження. Її технічна структура та функціональність дозволяють на практиці реалізовувати сучасні підходи до автоматизації, релейного захисту, оперативного керування й цифрової трансформації в умовах сучасного енергетичного сектору.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ТА РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

3.1 Аналіз розрахункової схеми та визначення параметрів елементів схеми

На рисунку 3.1 представлена розрахункова схема електричної мережі [10].

Опір енергосистеми визначається за стандартними методами [11].

Опір повітряних ліній:

$$X_{c1} = \frac{U_{c1}}{\sqrt{3} \times I_{K31}^{(3)}} = \frac{37}{\sqrt{3} \times 7} = 3.05 \text{ Ом}$$

$$X_{c2} = \frac{U_{c2}}{\sqrt{3} \times I_{K32}^{(3)}} = \frac{37}{\sqrt{3} \times 5} = 4.27 \text{ Ом}$$

Параметри трансформатора типу ТМН 6300/35: $S_H=6,3$ МВА, $U_{BH}=35$ кВ, $U_{HH}=11$ кВ, $P_X=8$ кВт, $P_K=46,5$ кВт, $U_K=7,5\%$.

Розрахунок опору трансформатора:

$$X_{T1min} = X_{T2min} = \frac{U_{Kmin} \times U_{Hmin}^2}{100 \times S_{HT}} = \frac{7.31 \times 31.85^2}{100 \times 6.3} = 11.27 \text{ Ом}$$

$$X_{T1max} = X_{T2max} = \frac{U_{Kmax} \times U_{Hmax}^2}{100 \times S_{HT}} = \frac{8.6 \times 38.15^2}{100 \times 6.3} = 19.86 \text{ Ом}$$

Опір кабельної лінії для перерізу 95 мм²:

$$X_{KL1} = X_{KL2} = X_0 \times l = 0.083 \times 3 = 0.25 \text{ Ом}$$

$$r_{KL1} = r_{KL2} = r_0 \times l = 0.326 \times 3 = 1 \text{ Ом},$$

де $r=0,083$ Ом/км, $x=0,326$ Ом/км, довжина лінії приймається за проектом.

Трансформатор типу ТСЗ 250/10 має параметри: $S_H=250$ кВА, $U_{BH}=10$ кВ, $U_{HH}=0,4$ кВ, $P_X=1$ кВт, $P_K=3,8$ кВт, $U_K=5,5\%$.

Опір розраховується аналогічно:

$$X_{TH1} = X_{TH2} = \frac{U_K \times U_H^2}{100 \times S_{HT}} = \frac{5.5 \times 10^2}{100 \times 0.25} = 22 \text{ Ом}$$

3.2 Обчислення струмів трифазного короткого замикання

У кожній точці короткого замикання (КЗ) виконується аналіз загального приведенного опору, після чого розраховується струм за формулою [11]:

$$K1: I_{K31}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times x_{c1}} = \frac{37 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 3.05} = 7000 A;$$

$$K2: I_{K32}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times x_{c2}} = \frac{37 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 4.27} = 5000 A;$$

$$K3: I_{K33}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times (x_{c1} + x_{l1})} = \frac{37 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (3.05 + 2.9)} = 3590 A;$$

$$K4: I_{K34}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times (x_{c2} + x_{l2})} = \frac{37 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (4.27 + 3.7)} = 2749 A;$$

$$K5: I_{K3minBH}^{(3)} = \frac{U_{maxBH}}{\sqrt{3} \times (x_{c2} + x_{l2} + x_{Tmax})} = \frac{38.15 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (4.27 + 3.7 + 19.86)} = 791 A$$

Таким чином:

$$I_{K3maxBH}^{(3)} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \times (x_{c1} + x_{l1} + x_{Tmin})} = \frac{35 \times 10^3}{\sqrt{3} \times (3.05 + 2.9 + 11.27)} = 1173 A$$

$$I_{K35min}^{(3)} = I_{K3minBH}^{(3)} \times \frac{U_{max}}{U_{HH}} = 791 \times \frac{38.15}{11} = 2743 A$$

$$I_{K35max}^{(3)} = I_{K35maxBH}^{(3)} \times \frac{U_n}{U_{HH}} = 1173 \times \frac{35}{11} = 3732A$$

Знайдемо сумарний опір в точці К5, який приведений до напруги 11кВ шин НН трансформатора (відходять від шин нижчої напруги):

$$x_{резминHH} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \times I_{K35max}^{(3)}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 3732} = 1.7 \text{ Ом}$$

$$x_{резmaxHH} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3} \times I_{K35min}^{(3)}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 2743} = 2.31 \text{ Ом}$$

Точка К6:

$$I_{K36min}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(x_{резmaxHH} + x_{кл})^2 + r_{кл}^2}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times \sqrt{(2.31 + 0.25)^2 + 1^2}} = 2313A$$

$$I_{K36max}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(x_{резминHH} + x_{кл})^2 + r_{кл}^2}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times \sqrt{(1.7 + 0.25)^2 + 1^2}} = 2902A$$

Точка К7:

$$I_{K37min}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(x_{резmaxHH} + x_{кл} + x_T)^2 + r_{кл}^2}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times \sqrt{(2.31 + 0.25 + 22)^2 + 1^2}} = 258.95A$$

$$I_{K37max}^{(3)} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \times \sqrt{(x_{резминHH} + x_{кл} + x_T)^2 + r_{кл}^2}} = \frac{11 \times 10^3}{\sqrt{3} \times \sqrt{(1.7 + 0.25 + 22)^2 + 1^2}} = 265A$$

Струми короткого замикання обчислювалися для точок К1...К7 на основі зведених параметрів елементів схеми [12].

3.3 Захист конденсаторної установки 10 кВ

Відповідно до вимог ПУЕ, передбачається такий перелік захисних заходів для КУ [6]:

1. Захист типу струмова відсічка для обмеження зовнішніх КЗ та КЗ на ошиновці.
2. Максимальний струмовий захист проти перенавантаження струмами гармонік, налаштований на 130% номінального струму.
3. Захист від перевищення допустимого рівня напруги.
4. Струмовий захист нульової послідовності для відключення при замиканнях на землю.
5. Автоматичне повторне включення КУ при поверненні напруги до норми.
6. Логічне блокування для секційних вимикачів.

Захист від багатofазних коротких замикань

Для першого методу обчислення струму спрацювання захисту застосовується формула [13]:

$$I_{сз} = k_n I_{вклКУ} = 1,5 \cdot 420 = 630A,$$

де $k_n = 1,5$ — коефіцієнт надійності; $I_{вкл}$ — амплітудне значення струму в момент включення.

Вибирається реле типу РТ-40/100. Коефіцієнт чутливості в точці К5 повинен бути не менше 2.

Другий підхід орієнтований на КУ малої потужності, де уставка струму може бути прийнята $2-2,5 I_{ном}$.

Максимальний струмовий захист

Захист налаштовується на $1,3 I_{ном}$.

$$I_{сз} = 1,3 \cdot I_{КУ}^{ном} = 1,3 \cdot 21 = 27,3A.$$

Струм спрацювання реле:

$$I_{cp} = \frac{k_{cx} I_{c3}}{n_{mc}} = \frac{1 \cdot 27.3}{10} = 2.73 A.$$

Для даного випадку приймається коефіцієнт трансформації трансформаторів струму на рівні 50/5. Схема їх підключення реалізується у вигляді неповної зірки з використанням двох реле.

Для реалізації захисної функції обрано реле типу РТ-40/6 з послідовним з'єднанням обмоток. Межі струму спрацювання для такого реле становлять від 1,5 до 3,0 А. Часова витримка захисту задається на рівні 0,5 с.

Для реалізації функції часової витримки передбачено встановлення реле типу ЕВ-114, яке має регулювання у діапазоні 0,1–1,3с. Захист приводить до автоматичного вимкнення вимикача конденсаторної установки у разі перевищення заданих уставок.

Струмовий захист нульової послідовності

Реле РТ-40 під'єднується через трансформатор струму типу ТЗ. Вибір уставок виконується з урахуванням ємнісного струму мережі.

$$I_{c3} = k_n \cdot 3I_{0KY}^{(1)},$$

де k_n – коефіцієнт надійності, приймаємо рівним 2-2,5;

$I_{0KY}^{(1)}$ – струм, обумовлений ємністю КУ.

Визначимо чутливість захисту:

$$k_q = \frac{3I_{0E}^{(1)}}{I_{c3}},$$

де $I_{0E}^{(1)}$ – струм нульової послідовності, обумовлений ємністю всієї електрично зв'язаної мережі без врахування типу КУ.

Захист вважається достатньо чутливим [13], якщо коефіцієнт чутливості становить не менше 1,5. Оскільки ємність конденсаторної установки відносно землі є малою, струм, який виникає при замиканні на землю, також має низьке

значення. Тому при встановленні уставок захисту доцільно орієнтуватися на найменші значення у межах шкали спрацювання реле.

Автоматика повторного включення

Спрацювання при зниженні напруги $U_{спр} = 0,7 \cdot U_{ном.}$

$$U_{спр_{авт.перв.}} = 0,95 \cdot U_{ном} = 0,95 \cdot 11 = 10,45 \text{ кВ},$$

$$U_{спр_{втор.}} = \frac{U_{спр_{авт.перв.}}}{n_{TH}} = \frac{10,45}{100} = 104,5 \text{ В},$$

$$\text{Де } n_{TH} = \frac{10000}{100} = 100.$$

Обрано реле РН-54/160. Витримка часу - 180 с. Передбачено амперметри та ватметр для контролю струму та реактивної потужності, вольтметр – для моніторингу напруги [14].

Логічне блокування шин

Використовується вихід контактів струмового реле для подачі блоку на дискретні входи захисту секційного вимикача [15]. На рисунку 3.2 наведена схема захисту конденсаторної установки, яка пояснює ланцюги струму, ланцюги напруги та ланцюги оперативного струму.

3.4 Заходи захисту кабельної лінії напругою 10 кВ

Для забезпечення надійної роботи кабельної лінії напругою 10 кВ передбачено реалізацію таких типів захисту [16]:

1. Струмова відсічка для виявлення міжфазних коротких замикань.
2. Максимальний струмовий захист.
3. Захист у випадку однофазного замикання на землю.
4. Логічний захист шин.

Струмова відсічка

Система струмової відсічки реалізована у вигляді двофазного захисту з використанням двох реле типу РТ-40 (позначені КА1 та КА2). Уставка струму

спрацювання погоджується з параметрами аналогічного захисту на трансформаторах ТП1 і ТП2. Струм спрацювання реле визначається залежно від коефіцієнта трансформації трансформатора струму (ТС), що становить 100/5. Встановлюється реле типу РТ-40/50 з послідовним з'єднанням котушок та діапазоном уставок 12,5–25 А.

Час спрацювання вибирається з урахуванням селективності щодо відсічки трансформатора потужністю 250 кВА — із запасом часу на 0,5 с більше. Для реалізації функції витримки часу використовується реле часу типу ЭВ-114 з діапазоном налаштувань 0,1–1,3 с.

Перевіряється чутливість струмової відсічки при двофазному короткому замиканні на шинах 10 кВ ТП1 або ТП2 у мінімальному режимі системи.

Максимальний струмовий захист [13]

Максимальний струмовий захист реалізується у вигляді двофазної схеми з трьома реле типу РТ-40 (КА1, КА2, КА3). Уставка за струмом встановлюється за такими критеріями: а) відсутність хибного спрацювання при короткочасних перевантаженнях:

$$I_{cз} = \frac{k_n \cdot k_{cзп} \cdot I_{робmax}}{k_{\epsilon} \cdot \frac{1,2 \cdot 3,0 \cdot 1,4 \cdot 14,4}{0,8}}$$

б) відповідність параметрам захисту трансформатора 250 кВА:

$$I_{cз} = k_{nc} \cdot I_{cзTp} = 1,2 \cdot 90,72 = 108,8 \text{ А.}$$

в) забезпечення чутливості до двофазного короткого замикання на шинах 10 кВ та 0,4 кВ

$$k_{\pm} = \frac{I_{\epsilon}^{(2)}}{I_{\tilde{n}\zeta}} = \frac{0,865 \cdot 2313}{108,8} = 18,38 > 1,5.$$

г) адекватна реакція на однофазні замикання на землю на шинах 0,4 кВ;

$$k_q = \frac{I_k^{(2)}}{I_{c3}} = \frac{0,865 \cdot 234}{108,8} = 1,84 > 1,2.$$

д) урахування коефіцієнта трансформації ТС, прийнятого рівним 100/5.

$$k_q = \frac{I_k^{(1)}}{I_{c3}} = \frac{234}{108,8} = 2,15 > 1,2.$$

Обирається реле типу РТ-40/6. Час спрацювання встановлюється із погодженням на час спрацювання МСЗ трансформаторів ТП1 або ТП2 (1,2 с).

$$t_{c3/I} = t_{c3/МСЗmp} + \Delta t' = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ с.}$$

Використовується реле часу типу ЭВ-124 з діапазоном уставок 0,25–3,5 с.

Захист від однофазних замикань на землю

У мережах з ізольованою нейтраллю струм замикання на землю визначається через ємності ліній.

$$I_3^{(1)} = 3 \cdot I_{0c} = \frac{U_{mf} \cdot l}{10}.$$

У непошкоджених лініях струм направлений до шин, у пошкодженій - від шин. Це дозволяє реалізувати селективний захист шляхом контролю струму, що протікає через трансформатор нульової послідовності (ТНП).

Для точності вимірювання струму ТНП, оболонка та броня кабелю на ділянці до ТНП ізолюються від землі, а провід, що з'єднує заземлення, пропускається через отвір ТНП.

Захист налаштовується на відсіч від струму, який виникає при замиканні на землю на інших приєднаннях або при міжфазних КЗ, а також враховує імпульси струму, що виникають при дуговому замиканні. Струм спрацювання

визначається за формулою з коефіцієнтами запасу (1,1–1,2) та імпульсності (4–5).

Для виявлення замикань на землю приймається реле типу РТЗ-51. Налаштування виконується на задане значення струму, що відповідає заданому первинному струму в ланцюзі.

Логічний захист шин [14]

У якості елемента логічного блокування в схемі захисту кабельної лінії використовується максимальний струмовий захист. Цей захист забезпечує високий рівень чутливості до міжфазних коротких замикань і перевантажень, що виникають у кабельній мережі. У разі виникнення аварійної ситуації, коли значення струму перевищує задану уставку, реле струмового захисту спрацьовує, активуючи миттєвий контакт реле часу. Цей контакт формує блокуючий сигнал, який через дискретний вхід передається до схеми керування захисту секційного вимикача. Таким чином реалізується функція логічного блокування, що запобігає помилковому або несанкціонованому вимкненню, підвищуючи селективність захисту та надійність електропостачання (рисунок 3.4). Такий підхід дозволяє координувати дії різних рівнів захисту, забезпечуючи узгоджену роботу пристроїв автоматизації та мінімізуючи ймовірність хибного спрацювання в нормальних режимах роботи мережі [16].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У даному розділі були розглянуті основні види захисту кабельної лінії напругою 10 кВ, включаючи струмову відсічку, максимальний струмовий захист, захист від однофазних замикань на землю та логічний захист шин. Здійснено аналіз конструкції та принципів дії кожного типу захисту, а також визначено основні параметри уставок відповідних реле.

Показано, що правильна координація часу спрацювання та налаштувань захисних пристроїв дозволяє досягти високої селективності та чутливості захисту, запобігаючи помилковим відключенням і забезпечуючи швидке реагування на аварійні ситуації. Особливу увагу приділено вибору реле, відповідно до режимів роботи мережі та її конфігурації.

Запропоновані заходи дозволяють значно підвищити надійність функціонування кабельної лінії та знизити ймовірність пошкодження обладнання у випадку коротких замикань або інших порушень режиму. Упровадження комплексного підходу до організації захисту сприяє підвищенню загальної ефективності та безпеки експлуатації енергетичних об'єктів.

РОЗДІЛ 4 КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ НА ВВОДАХ І ЛІНІЯХ 35 кВ

4.1. Захист на введеннях ліній 35 кВ Л1 (Л2) за допомогою вимикачів Q1 (Q2)

На вводах 35 кВ Q1 (Q2), що живлять лінії Л1 (Л2), передбачено реалізацію захисту за струмовою відсічкою, яка має можливість блокування зовнішнім цифровим сигналом, що надходить на відповідний дискретний вхід [12].

Конструктивно схема відсічки передбачає двофазне виконання з використанням реле типу РТ-40 (КА-1, КА-2) та вихідного проміжного реле КЛ. В якості вимірювальних елементів використовуються трансформатори струму серії ТФЗМ-35, встановлені у фазах А та С, з коефіцієнтом трансформації 300/5.

Параметри уставки струму спрацювання обрані так, щоб забезпечити чутливість до двофазних коротких замикань на шинах 35 кВ на рівні не менше 2. При коротких замиканнях на стороні трансформаторів, струмова відсічка на вводах 35 кВ блокується схемою логічного захисту шин (ЛЗШ). У випадку КЗ безпосередньо на шинах секції 35 кВ, ЛЗШ не втручається, і захист діє для вимкнення вимикача Q1 (Q2).

Струм спрацювання реле відсічки обчислюється за встановленими методиками:

$$I_{сз} = \frac{I_{кmin}^{(2)}}{k_u \frac{2378}{2}}$$

Струм спрацювання реле визначається:

$$I_{ср} = \frac{k_{сх} \cdot I_{сз}}{n_{ТС}} = \frac{1 \cdot 1188.9}{60} = 19,8A.$$

До установки приймаються реле типу РТ-40/20 з паралельним з'єднанням котушок та діапазоном уставок від 10 до 20 А. Вихідне реле КЛ реалізується на базі реле типу РП-252 з уповільненням на розмикання 0,15 с (Рисунок 4.1).

4.2 Система релейного захисту та автоматики для ліній 35 кВ

Згідно з вимогами ПУЕ [6], для живильних ліній 35 кВ впроваджуються такі типи захисту:

1. Струмова відсічка без затримки (селективна);
2. Струмова відсічка із витримкою часу;
3. Максимальний струмовий захист (МСЗ);
4. Автоматичне повторне включення (АПВ).

Селективна струмова відсічка

Захист реалізовано у вигляді двофазної схеми з двома реле типу РТ-40 (КА1, КА2). Уставки струму спрацьовування визначаються так, щоб бути вищими за струми короткого замикання на протилежному кінці захищуваної лінії. Для Л1 це точка К3, для Л2 — точка К4. Чутливість відсічки також перевіряється у місці встановлення захисту (К1 для Л1 та К2 для Л2).

$$I_{сз} \geq k_n \cdot I_{кmax}^{(3)}$$

Лінія 35 кВ Л1:

$$k_q = \frac{I_{кmin}^{(2)}}{I_{сз} \frac{0,865 \cdot 7000}{4308}}$$

б) Струм спрацьовування струмової відсічки лінії 35кВ Л2:

$$I_{сз} \geq k_n \cdot I_{кmax}^{(3)}$$

Лінія 35 кВ Л2 :

$$k_q = \frac{I_{\kappa min}^{(2)}}{I_{cз} \frac{0,865 \cdot 5000}{3298,8}}$$

Чутливість струмових відсічок може бути прийнята для захисту лінії при КЗ на початку лінії.

в) Струм спрацювання реле для лінії 35кВ Л1:

$$I_{cp} = \frac{I_{св} \cdot k_{сх}}{n_{ТС}} = \frac{4308 \cdot 1,0}{60} = 71,8A.$$

Для обох ліній приймається реле типу РТ-40/100 з паралельним з'єднанням обмоток і діапазоном струмів спрацювання 50–100 А. Вимірювання здійснюється трансформаторами струму ТФЗМ-35.

Відсічка з часовою затримкою

Цей тип захисту базується на двофазній схемі з двома реле РТ-40 (КАЗ, КА4) та реле часу типу ЭВ-112 (КТ1) з налаштуванням витримки в межах 0,1–1,3 с. Уставка струму обирається з урахуванням того, щоб захист не реагував на КЗ на нижчій стороні трансформатора (точка К5). При цьому враховується коефіцієнт надійності, який приймається рівним 1,4. Чутливість перевіряється для точок К3 і К4.

$$k_q = \frac{0,865 I_{\kappa 34 min}^{(3)}}{I_{cз}} = \frac{0,865 \cdot 2749}{1642,2} \approx 1,5.$$

Визначимо час спрацювання захисту:

$$t_{cз} = 0,5с.$$

А трансформатори струму буде застосовано типу ТФЗМ-35, які мають коефіцієнтом трансформації: $n_{TC} = \frac{300}{5}$. Схема з'єднання ТС в неповну зірку з двома реле.

А струм спрацьовування реле:

$$I_{cp} = \frac{I_{cз} \cdot k_{cx}}{n_{TC}} = \frac{1642 \cdot 1,0}{60} = 27,4A.$$

До встановлення пропонуються реле типу РТ-40/50.

Максимальний струмовий захист [13]

Максимальний струмовий захист виконується у формі двофазної схеми з трьома реле типу РТ-40 (КА5, КА6, КА7) і реле часу ЭВ-122 (КТ2). Струм спрацьовування розраховується з урахуванням післяаварійного перевантаження, самозапуску навантаження, та узгодження з МСЗ трансформаторів потужністю 6300 кВА. До встановлення приймається реле типу РТ-40/10. Обмотки реле з'єднані паралельно. Визначення вторинного струму спрацьовування проводиться на підставі коефіцієнта схеми та трансформації ТС.

$$I_{cз} = \frac{k_n \cdot k_{cз.п.}}{k_{пов}} \cdot 2 \cdot I_{нт} = \frac{1,2 \cdot 1,5}{0,8} \cdot 2 \cdot 104 = 468A,$$

де $I_{нт}$ - номінальний струм трансформатора; k_n - коефіцієнт надійності; $k_{cз.п.}$ - коефіцієнт самозапуску навантаження; $k_{пов}$ - коефіцієнт повернення реле. За умовою узгодження з чутливістю МСЗ трансформатора 6300 кВА:

$$I_{cз} \geq k_n \times I_{МТЗ.Т} = 1,1 \times 576 = 633,6A$$

Таким чином, прийmemo більшу величину із двох умов, тобто $I_{cз} = 633,6A$.

Коефіцієнт чутливості перевіряється в точках К3, К4 і К5 у мінімальному режимі. Витримка часу на спрацювання приймається з урахуванням узгодження з трансформатором (1,6 с). Застосовується реле часу ЭВ–122 з можливістю

налаштування в межах 0,25–3,5 с. Передбачається прискорений режим МСЗ при АПВ - до 0,5 с.

Автоматичне повторне включення (АПВ)

Для ефективного АПВ важливо [14], щоб з моменту вимкнення лінії до повторного включення пройшов час, достатній для згасання дуги та відновлення ізоляції повітря (деіонізації), тобто:

$$t_{АПВ} \geq t_{\delta} + t_{зан} = 0,3 + 0,3 = 0,6с.$$

Згідно з практикою, оптимальний час АПВ для повітряних ліній 35 кВ з одностороннім живленням становить 3 с.

При такій витримці усуваються випадкові короточасні пошкодження (наприклад, падіння гілок, накиди предметів, пересування механізмів тощо). Для реалізації АПВ приймається реле типу РПВ–58.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У цьому розділі було детально проаналізовано технічні рішення щодо впровадження захисту на вводах ліній 35 кВ та у самих лініях. Запропоновані рішення базуються на використанні класичних релейних пристроїв типу РТ-40 у поєднанні з трансформаторами струму серії ТФЗМ-35, що дозволяє забезпечити належну чутливість до аварійних режимів, зокрема коротких замикань.

Проведено обґрунтування доцільності застосування як миттєвих, так і уповільнених струмових відсічок, з урахуванням селективності дій захистів. Для кожного типу захисту визначено уставки, розраховано значення струмів спрацювання, а також забезпечено узгодженість між функціями МСЗ, АПВ та логічного блокування.

Особливу увагу приділено функції автоматичного повторного включення (АПВ), яка підвищує надійність електропостачання шляхом ліквідації нестійких пошкоджень без участі персоналу. Вибір витримки в 3 с відповідає практичному досвіду експлуатації повітряних ліній напругою 35 кВ.

Результати розрахунків та аналізу дозволяють зробити висновок про ефективність реалізованої стратегії захисту та її відповідність сучасним вимогам до безперервного, безпечного й автоматизованого електропостачання промислових та сільськогосподарських споживачів.

РОЗДІЛ 5. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ

5.1 Заходи з охорони праці при експлуатації та обслуговуванні систем релейного захисту

Під час проєктування та експлуатації систем релейного захисту ліній електропередачі 35 кВ особливу увагу слід приділяти заходам охорони праці. Враховуючи роботу з електроустановками високої напруги, усі операції повинні відповідати вимогам нормативних документів: Правил охорони праці під час експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), ПУЕ, ДНАОП та інших регламентуючих актів [17, 18].

Електробезпека

Для роботи на енергооб'єктах працівники повинні мати відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки, пройти інструктаж, медичний огляд і бути допущеними до виконання робіт наказом по підприємству. Основні засоби захисту: діелектричні рукавички, калоші, килимки, покажчики напруги, ізольований інструмент, переносні заземлення.

Перед проведенням будь-яких робіт обов'язково перевіряється відсутність напруги за допомогою справного індикатора, після чого встановлюються переносні заземлення. Робота під напругою дозволяється лише у випадках, передбачених інструкціями, і виконується з дотриманням спеціальних заходів безпеки.

Вимоги до персоналу

До робіт з релейним захистом допускаються лише працівники, які мають відповідну підготовку. Усі роботи повинні проводитися щонайменше двома особами. Обов'язковим є ведення оперативного журналу, де фіксуються всі перемикання та виконані дії. Персонал повинен дотримуватися правил поведінки в електроустановках, не залишати відкритими шафи та пристрої, не проводити випробувань або налагодження без дозволу.

Пожжежна безпека

У приміщеннях розміщення електрообладнання мають бути передбачені первинні засоби пожежогасіння: вуглекислотні або порошкові вогнегасники, азбестові полотна, пісок. Категорично забороняється зберігання легкозаймистих матеріалів поруч із силовими шафами та трансформаторними підстанціями. Всі пристрої мають бути захищені від перегріву, замикань та витоків струму.

Безпечне розміщення обладнання та організація робочого місця [19]

Усі електричні шафи (ШОТ, ШЗ, шафи АПВ, захистів тощо) повинні мати надійне заземлення. Внутрішнє розведення виконується із застосуванням маркованих проводів. Доступ до них має бути обмежений, дверцята повинні закриватися на замки. Робочі місця обладнуються достатнім освітленням, а проходи — бути вільними від перешкод.

Таким чином, дотримання заходів з охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки при проєктуванні, монтажі й експлуатації систем релейного захисту ліній 35 кВ є необхідною умовою безпечної, ефективної та безперервної роботи енергетичного обладнання.

5.2 Екологічна експертиза запропонованого проектного рішення

У межах реалізації проєкту з організації релейного захисту та автоматики для ліній 35 кВ проведено всебічну екологічну експертизу впровадженого технічного рішення. Основна увага приділялася оцінці можливого негативного впливу обладнання на навколишнє середовище, а також забезпеченню екологічної безпеки для персоналу та населення, що перебуває у зоні розміщення об'єкта [18].

Проектне рішення передбачає встановлення сучасного мікропроцесорного релейного обладнання, яке характеризується високою енергоефективністю, низьким рівнем шуму та відсутністю викидів шкідливих речовин в атмосферу, ґрунт або воду. Робота системи релейного захисту є повністю автоматизованою і не супроводжується процесами згорання чи утворення побічних хімічних сполук, що підтверджує її безпечність з точки зору екології.

Під час експлуатації обладнання дотримуються вимог екологічної безпеки, встановлених нормативними актами України, зокрема ДСанПіН 3.3.6.096-2002 [19], ДСТУ ISO 14001, ДСТУ ISO 1996. Рівень електромагнітного випромінювання обладнання не перевищує гранично допустимих значень, шумові характеристики не створюють додаткового акустичного навантаження для обслуговуючого персоналу.

Усі компоненти обладнання, передбачені проектом, мають сертифікати екологічної відповідності та підлягають утилізації або вторинній переробці після завершення терміну експлуатації. Застосування мікропроцесорних пристроїв дозволяє зменшити втрати електроенергії, знизити тривалість аварійних режимів, що в свою чергу зменшує загальне енергоспоживання системи та сприяє її екологічній сталості.

Додатково, у проекті враховано впровадження автоматичних систем моніторингу стану навколишнього середовища, які дозволяють своєчасно реагувати на будь-які відхилення параметрів, забезпечуючи стабільну роботу без негативного впливу на довкілля.

Таким чином, реалізація проектного рішення не суперечить чинним екологічним нормам і стандартам, не потребує проведення процедури оцінки впливу на довкілля (ОВД), не призводить до деградації природних ресурсів та забезпечує безпечне функціонування енергетичного об'єкта у довгостроковій перспективі.

5.3 Розрахунок економічної ефективності впровадження установки

Оцінка економічної ефективності впровадження релейного захисту базується на аналізі витрат, пов'язаних з придбанням, монтажем і експлуатацією системи, у порівнянні з отриманими перевагами: зменшенням простоїв, зниженням збитків від аварій, зниженням витрат на ремонт і обслуговування [20].

Переваги впровадження мікропроцесорного релейного захисту включають:

- своєчасне відключення пошкоджених ділянок, що мінімізує масштаб аварій;
- автоматичне виявлення та діагностика несправностей;
- підвищення точності та швидкодії системи захисту;
- зменшення витрат на обслуговування за рахунок меншого зносу обладнання;
- скорочення перерв у енергопостачанні та зменшення енергетичних втрат.

Очікувані результати впровадження релейного захисту [20, 21]:

- зниження середньої тривалості відновлення після аварій на 20–25%;
- зменшення кількості аварійних вимкнень на 30%;
- підвищення загальної ефективності використання електроенергії на 10–12%;
- економія витрат на обслуговування та ремонт – щонайменше 15% щорічно.

У таблиці 5.1 наведено приблизні розрахункові показники, щодо впровадження системи релейного захисту.

Таблиця 5.1 - Розрахункові показники, щодо впровадження системи релейного захисту

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна (%)
Середня кількість аварій на рік	12	8	-33%
Середній час простою за аварію, год	6	4.5	-25%
Втрати електроенергії, тис. кВт·год/рік	160	125	-22%

Витрати на ремонт, тис. грн/рік	480	390	-18.8%
Витрати на обслуговування, тис. грн/рік	260	220	-15.4%

Окупність системи релейного захисту

- Орієнтовна вартість обладнання та монтажу: 1200 тис. грн;
- Щорічна економія від зменшення аварій і простоїв: ≈ 400 тис. грн;
- Орієнтовний термін окупності: 3 роки.

Таким чином, впровадження системи мікропроцесорного релейного захисту є технічно обґрунтованим і економічно доцільним рішенням. Завдяки значному зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності та ефективності енергопостачання, така модернізація забезпечує довготривалі вигоди як для підприємства, так і для енергетичної системи загалом.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі розглянуто ключові аспекти, пов'язані з безпекою, екологічністю та економічною ефективністю впровадження систем релейного захисту для ліній 35 кВ. Аналіз показав, що при дотриманні нормативних вимог щодо охорони праці, застосуванні сертифікованих захисних засобів та правильній організації робіт забезпечується високий рівень безпеки персоналу.

Проведена екологічна експертиза підтвердила відповідність обладнання чинним стандартам, відсутність шкідливого впливу на довкілля, низький рівень електромагнітного випромінювання та шуму. Також підтверджено екологічну стійкість і можливість вторинної переробки елементів системи.

Економічний аналіз засвідчив доцільність інвестицій у мікропроцесорні пристрої релейного захисту: очікувана окупність становить близько трьох років, за рахунок зменшення витрат на ремонт, втрати електроенергії та простої. Це дозволяє не лише підвищити ефективність і надійність енергосистеми, але й покращити загальну стійкість підприємства до аварійних ситуацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи:

1. Здійснено огляд розвитку систем релейного захисту — від електромеханічних до сучасних мікропроцесорних пристроїв. Детально проаналізовано переваги цифрових технологій у захисті енергетичних об'єктів, їх функціональні можливості, інтеграцію з автоматизованими системами керування (SCADA, Smart Grid), а також відповідність міжнародним стандартам ІЕС.

2. На основі здійсненого аналізу досліджено електротехнічну структуру головної понижувальної підстанції 35/10 кВ. Складено однолінійну схему, обґрунтовано вибір трансформаторів, вимикачів, захисного та комутаційного обладнання. Розглянуто принципи роботи шафи оперативного струму ШОТ-01 та організацію живлення схем управління і сигналізації, що забезпечує надійність і безперервність роботи системи.

3. Здійснено аналітичні розрахунки активних і реактивних опорів елементів мережі, а також визначено струми трифазних коротких замикань у ключових точках системи (К1–К7). Проведено вибір і налаштування захисту для кабельних ліній і конденсаторних установок. Встановлено, що струмові та максимальні захисти, а також захисти від замикань на землю забезпечують необхідну чутливість, селективність і швидкодію, згідно з нормативними вимогами.

4. Реалізовано проектування комплексної системи релейного захисту на вводах і лініях 35 кВ. Розроблено та розраховано параметри для селективної відсічки, відсічки з витримкою часу, МСЗ та АПВ. Проведено узгодження витримок часу, перевірено коефіцієнти чутливості в аварійних точках, що підтвердило відповідність схем вимогам ПУЕ та забезпечило селективне реагування на аварії в системі.

5. Надано комплекс заходів з охорони праці під час проєктування, монтажу та експлуатації систем релейного захисту. Визначено вимоги до персоналу, засобів захисту, організації робіт і пожежної безпеки. Підкреслено, що

дотримання норм охорони праці є критично важливим чинником забезпечення надійної та безпечної роботи електроустановок.

6. Проаналізовано вплив впровадженої системи на навколишнє середовище. Встановлено, що мікропроцесорні реле не створюють шкідливих викидів, не потребують ресурсів під час експлуатації, мають низький рівень шуму та електромагнітного впливу, підлягають утилізації або вторинному використанню, що забезпечує екологічну сталість рішення.

7. Проведено розрахунок економічної ефективності впровадження запропонованої системи. Доведено, що очікуване скорочення кількості аварій, часу простоїв, втрат електроенергії та витрат на ремонт дозволяє досягти економії понад 400 тис. грн на рік із терміном окупності близько 3 років. Це робить систему доцільною не лише технічно, але й з погляду економіки підприємства.