

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

Гуцал Саша Григорович

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз та обґрунтування струмового захисту районних розподільчих  
електричних мереж 6-35 кВ  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Гуцал С. Г.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Рассадкіна Марина Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.ф-м.н., доцент кафедри вищої та  
прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Гуцал С. Г. Аналіз та обґрунтування струмового захисту районних розподільчих електричних мереж 6-35 кВ. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Мета даної роботи є розробка алгоритмів аналізу роботи функцій релейного захисту та автоматики мереж 6- 35 кВ з використанням отриманих даних про місце пошкодження.

Визначена схема діагностики пристроїв релейного захисту та автоматики на основі розрахунків алгоритму визначення місця ушкодження.

**Ключові слова:** районні мережі, релейний захист, алгоритм аналізу роботи.

## ABSTRACT

Hutsal S. G. Analysis and substantiation of current protection of district distribution electric networks 6-35 kV. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The purpose of this work is to develop algorithms for the analysis of relay protection functions and automation of 6-35 kV networks using the received data on the location of damage.

The diagnostic scheme of relay protection and automation devices is determined based on calculations of the algorithm for determining the location of damage.

**Keywords:** district networks, relay protection, work analysis algorithm.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВИДІВ ЗАХИСТУ МЕРЕЖ 6-35 кВ	6
1.1 Основні види захисту розподільчих мереж	6
1.2 Умови узгодження струмових захистів за струмом та за часом	16
1.3 Розрахунок установок максимальних струмових захистів від міжфазних коротких замикань	18
Висновки по розділу 1	23
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК 6 – 35 кВ З ФУНКЦІЯМИ ПОПЕРЕДЖЕНЬ ПОШКОДЖЕНЬ	25
2.1 Захист від замикань на землю в мережах 6-35 кВ	25
2.2. Вибір струму спрацьовування ненаправленого захисту ЗЗ.	28
Висновки по розділу 2	30
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ПОБУДОВИ РЕЛЕЙНИХ ЗАХИСТІВ ЯКІ ОБ'ЄДНУЮТЬ РІЗНІ ФУНКЦІЇ	32
3.1 Побудова релейного захисту електроустановок 6 – 10 кВ з функціями попередження пошкодження які розвивається	32
3.2 Розробка алгоритмів аналізу роботи функцій релейного захисту і автоматики з використанням даних про місце ушкодження	40
Висновки по розділу 3	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55

## ВСТУП

Однією із проблем експлуатації мереж 6-10 кВ є виникнення аварійних режимів, найпоширенішими з яких є однофазні замикання на землю. Найчастіше такі замикання переходять в міжфазні короткі замикання, супроводжуються відкритою електричною дугою всередині замкнутого обсягу закритих електроустановок. Дана проблема обумовлена недосконалістю конструкції такого роду електроустановок та недостатнім рівнем досконалості їх захисту.

Переважає більшість електричних мереж напругою 6-35 кВ працюють в режимі з ізольованою нейтраллю. Як відомо, в мережах з ізольованою нейтраллю замикання фази на землю не є коротким замиканням і не вимагає негайного відключення [1]. Це дозволяє зберегти мережі в роботі при тривалих замиканнях фази на землю шляхом визначення, виділення і відключення місця ушкодження.

Одним із перспективних напрямів розвитку технологій релейного захисту мереж 6-35 кВ є створення централізованої системи релейного захисту та автоматики. При цьому актуальною є також завдання розробки апаратно-програмного комплексу діагностики даної системи, який дозволить покращити селективність, швидкодію, чутливість та надійність роботи релейного захисту

**Мета даної роботи** - розробка алгоритмів аналізу роботи функцій релейного захисту та автоматики мереж 6- 35 кВ з використанням отриманих даних про місце пошкодження.

**Ціль роботи:** розглянути схему діагностики пристроїв релейного захисту та автоматики на основі розрахунків алгоритму визначення місця ушкодження.

**Завдання на дослідження:** з урахуванням даних, отриманих у результаті роботи алгоритму необхідно визначити місце пошкодження, для чого потрібно розглянути і проаналізувати наступні види захистів:

- 1) максимальний струмовий захист;
- 2) струмова захист нульовий послідовності;
- 3) захист мінімального напруги;
- 4) дистанційний захист;
- 5) спрямований високочастотний захист.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ВИДІВ ЗАХИСТУ МЕРЕЖ 6-35 кВ

#### 1.1 Основні види захисту розподільчих мереж

У якості найбільш поширених релейних захистів розбрат-ділительних мереж напругою 6–35 кВ застосовують[1]:

- максимальну струмову захист (МСЗ);
- струмову відсічення (СО);
- захист від навантаження (ЗП);
- захист від замикання на землю (ЗЗ);
- дугову захист (ДЗ);
- логічний захист шин (ЛЗШ);
- захисту з забезпеченням логічної селективності.

**Принципи виконання МСЗ і СО.** Основними видами релейного захисту радіальних ліній є триступінчасті струмові захисту. Перший ступінь - струмове відсікання без витримки часу, друга сходинка - струмова відсікання з витримкою часу і третя сама чутлива сходинка - максимальний струмовий захист. на коротких лініях. Виконати триступінчастий захист часто буває неможливо по умові недостатньою чутливості першого або другого ступеня струмового відсічення. Тоді застосовують або два щаблі - ТО без витримки часу і МСЗ, або одну сходинку - тільки МСЗ [7]. Таким чином, МСЗ є основним, а іноді єдиним захистом на лініяхнапругою 6–35 кВ. Такі захисти (МСЗ і СО без витримки часуі з витримкою часу) входять в склад мікропроцесорних реле.

Завданням МСЗ є не тільки захистити свою лінію, але ізабезпечити далі резервування в випадку відмови захисту або виключення при ушкодженнях на нижче стоячих (наступних) лініях.

МСЗ який контролює струм в елементі захисту, відбудовується від струму навантаження і при перевищенні струму уставки пускових реле з витримкою часу діє його відключення. МСЗ - це захист з відносною селективністю. МСЗ не тільки забезпечує відключення КЗ на своїй лінії, але,

якщо дозволяє його чутливість, резервує відключення КЗ на суміжній ділянці.

Селективність МСЗ забезпечується його витримкою часу. Витримки часу суміжних МСЗ відрізняються на величину, яка називається ступенем селективності  $\Delta t$ . Недоліком МСЗ є те, що по мірі наближення місця встановлення захисту до джерела живлення збільшується його витримка часу. При цьому збільшується і величина струму КЗ і тому обсяг ушкодження зростає [2].

Для захисту, виконаного на електромеханічній базі, ступінь селективності  $\Delta t$  складає 0,5-0,6 с. Мікропроцесорні захисту дозволяють забезпечити ступінь селективності, що дорівнює 0,2-0,3 с, що є першим способом зменшення часу спрацьовування МСЗ [9].

Другим способом зменшення витримки часу захисту є застосування МСЗ із залежною від струму характеристикою витримки часу. За такої характеристики витримка часу МСЗ автоматично зменшується по мірі збільшення струму КЗ.

Для якнайшвидшого відключення КЗ та зменшення об'єму пошкоджень, застосовується струмове відсічення, яке працює без витримки часу. Для забезпечення селективності СО відбудовується від струму КЗ в кінці лінії яка захищається або струму КЗ за трансформатором.

У кільцевих мережах і на лініях з двостороннім живленням в більшості випадків неможливо забезпечити селективність дії МСЗ.

У таких випадках застосовується спрямований (направлений) МСЗ (МСНЗ), орган потужності якої дозволяє дію захисту при напрямку потужності КЗ від шин в лінію.

МСЗ з пуском по напрузі застосовують у тому випадку, коли звичайний МСЗ не задовольняє вимогам по чутливості. Принцип дії МСЗ з пуском по напрузі оснований на тому, що в режимі КЗ відбувається в системі електропостачання зниження напруги. Тому, використовуючи пусковий

орган по напрузі, можна відрізнити режими перевантаження та самозапуску двигунів від режиму КЗ.

***Принципи виконання захисту від замикання землі. Захист від замикань на землю (ЗЗ) на лініях, як правило, діє на сигнал.*** Застосування ЗЗ доцільно, тому що місце замикання на землю треба знайти і швидко усунути, тому що, наприклад, провід, що впав на землю, небезпечний для оточуючих. Крім того, пошкодження у місці замикання на землю може призвести до міжфазним КЗ у мережі. У ряді випадків захист повинен обов'язково діяти на відключення двигунів та генераторів при струмі замикання на землю 5 А і більше [1].

У цифрових реле для захисту нульової послідовності використовуються ті ж принципи побудови, що і в аналоговому захисту.

Для мереж із компенсованою нейтраллю ці принципи ЗЗ не придатні, так як величина струму на пошкодженій лінії може бути менше, чим на непошкодженій і напрямок цього струму може бути різним. Для мереж з компенсованою нейтраллю використовуються спеціальні захисти, працюючі на вищих гармоніках, враховуючи, що котушка, що дугогасить (ДГК) в нейтралі компенсує тільки основну гармоніку струму, а вищі гармоніки залишаються.

***Логічний захист шин (ЛЗШ).*** КЗ на шинах КРУ приведуть до руйнування пошкоджених та суміжних осередків, якщо вони відключаються з витримкою часу МСЗ введення або з витримкою часу МСЗ секційного вимикача [10]. Тому осередки забезпечуються спеціальними пристроями захисту шин, які називають логічним захистом шин (ЛЗШ). Принцип організації ЛЗШ полягає в тому, що струмові відсічки, що застосовуються у цифрових захистах, дозволяють блокувати себе зовнішнім сигналом, поданим на дискретний вхід мікропроцесорного реле. Принцип ЛЗШ може бути реалізованим тільки на цифрових реле.

При КЗ на шинах захисту секційного або ввідного вимикача негайно відключать пошкодження за умови, якщо не запустився захист на жодній з



ліній, що відходять. Пуск захисту на якій-небудь лінії яка відходить, свідчить про зовнішнє, по відношенню шин, замиканні. Пристрої захисту ліній яка відходить, забезпечені миттєвим струмовим контактом. Цей миттєвий струмівий контакт служить для блокування струмового відсічення введення та секційного вимикача.

Принцип дії струмового логічного захисту шин показаний на рис. 1.1. Токові блокуючі органи ЛЗШ виводяться від кожного фідера на шинки блокування ЛЗШ і надходять на дискретний вхід захисту вступного (ВВ) та секційного (СВ) вимикачів. При КЗ в точці К2 спрацьовує захист відхідної лінії і на захист вводу та й секційного вимикача (при живленні секції від СВ) подається блокуючий сигнал, що виводить з дії відсічення введення та секційного вимикача. При КЗ у точці К1, тобто на шинах, струм КЗ не протікає в жодній із захищених відхідних ліній, тому відсікання не блокується і вона працює на відключення живильного введення або секційного вимикача без витримки часу.

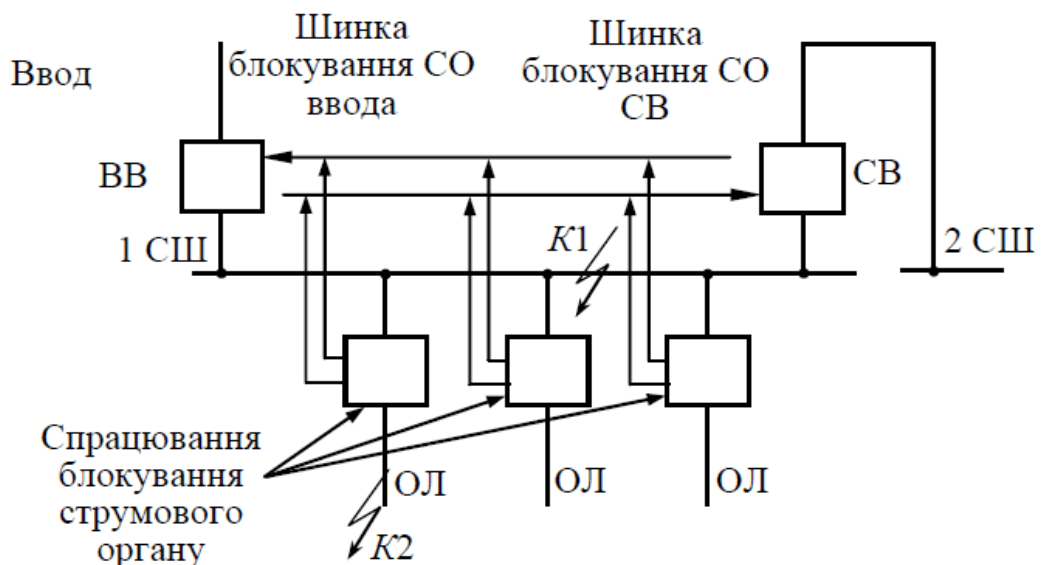


Рисунок 1.1. Принцип дії логічної захисту шин

**Логічна селективність.** Принцип логічної селективності може бути реалізований на цифрових реле. Цифрові реле повинні бути об'єднані лінією зв'язку – оптико-волоконною або телефонною (через модем) з метою передачі

(прийому) інформації на центрального диспетчерського пункт у системі АСУ ТП. Цей зв'язок дозволяє передавати і приймати сигнали логічного очікування від одного до іншому реле, розміщених на різних об'єктах (рис. 1.2).

У кожному цифровому реле АК1, АК2, АК3, АК4 використовується окремо. ний ступінь струмового захисту, що має таку ж уставку по струму спра- бачення, як і найчутливіший ступінь МТЗ. Час спрабати- вання цього окремого ступеня приблизно дорівнює 0,2 с, тобто вона є- ся швидкодіючої як струмове відсічення [9]. Однак цей щабель може бути заблокована сигналом логічного очікування (ЛО), пе- редагованого по каналу зв'язку від реле попереднього захисту.

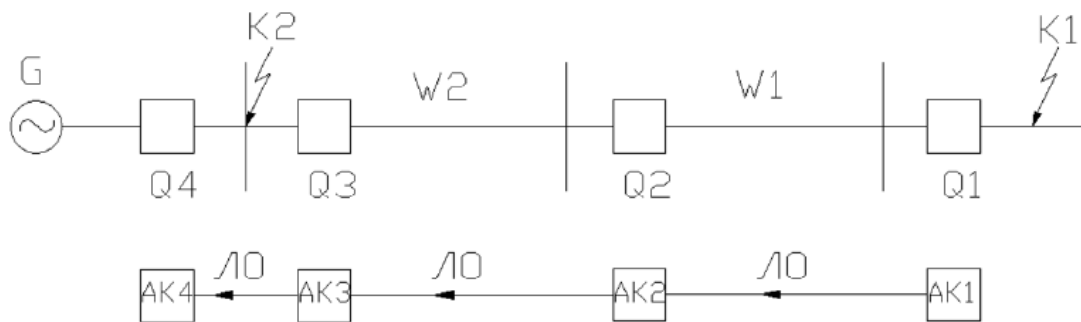


Рисунок 1.2 . Принцип дії логічною селективності в радіальній мережі

Розглянемо принцип дії логічної селективності на прикладі захисту радіальної мережі (рис. 1.2). Коли КЗ відбувається в радіальній мережі, струм КЗ протікає по ланцюгу від джерела живлення до точки КЗ. Наприклад, при КЗ у точці К1 спрацьовують пускові органи попереднього АК1 і наступних АК2, АК3, АК4 захистів. Реле АК1 передає на всі наступні захисти АК2, АК3 і АК4 сигнал логічного очікування та швидкодіючі їх ступені блокуються. Але МСЗ із тимчасовою селективністю залишаються у роботі. В данному прикладі без витримки часів спрацює реле АК1 і відключить КЗ в точці К1. При КЗ в точці К2 попередні реле АК1, АК2 і АК3 не спрацьовують, оскільки через них струм КЗ не проходить. Реле АК4 не отримує сигнал ЛО та тому відключить КЗ без уповільнення.

Таким чином, функція логічною селективності, в відмінність від

звичайного МСЗ забезпечує селективність без накопичення витримок часу на головні елементи. Основна вимога логічної селективності - необхідність мати надійні лінії зв'язку ЛО.

**Дуговий захист.** Комплектні розподільчі пристрої (КРП або КРПН) напругою 6–35 кВ внутрішньої та зовнішньої установки є одним з найбільш масових елементів підстанцій розподільчих електричних мереж, основними перевагами яких є малі габаритні розміри, високий ступінь готовності до монтажу та налагодження.

Наслідки дугового КЗ або замикання на землю в розподільчих пристроях напругою 6–35 кВ можуть бути дуже важкими. Дуговий розряд здатний вивести з ладу обладнання та визвати тривалі та дорогі простої. Крім того, електрична дуга може нанести важкі травми персоналу.

Причинами виникнення дуги можуть бути: пошкодження та старіння ізоляції, несправність обладнання, неправильні з'єднання шин або кабелів, перенапруги, корозія, забруднення, волога, а також помилки персоналу.

При виявленні та мінімізації наслідків дугового розряду ключовим чинником є час. Дуговий розряд протягом 500 мс може привести до повного вигорання осередку [11]. При тривалості дугового розряду менше 100 мс ушкодження часто мають менший масштаб, а якщо дуга усувається менше ніж за 35 мс, ушкодження майже непомітні.

Найбільші руйнування осередків КРП відбуваються в результаті дугових замикань у самих осередках чи збірних шинах. Для запобігання руйнування осередків (а в деяких випадках і всього КРП) необхідно використовувати дуговий захист. У ПТЕ застосування швидкодіючого захисту від дугових КЗ усередині шаф КРУ 6–35 кВ є обов'язковим.

Пристрій дугового захисту виявляє дугу в розподільному пристрої і вимірює струм пошкодження, що виник внаслідок дугового замикання. При виявленні пошкодження реле дугового захисту без витримки часу вимикає вимикач. Пристрої дугового захисту діють на відключення набагато швидше

за МСЗ і СО і, таким чином, пошкодження обладнання внаслідок виникнення дуги можуть бути зменшені.

Принцип дії пристроїв дуговий захисту полягає в тому, що датчики надсилають сигнал на мікропроцесор дугового захисту. За принципом дії датчиків дуги розрізняють застосування вихлопних клапанів, фототиристорів, волоконно-оптичних датчиків.

Існують два основних виду дугових захистів [11]:

- механічний, який налаштовується на збільшення тиску всередині обсягу осередку в результаті горіння дуги;
- електронний, який налаштовується на світловий потік, що буває в момент виникнення дугового замикання - фототиристорна або оптоволоконна (ВОД).

Для виключення помилкових спрацьовувань дуговий захист може бути виконаний з контролем струму КЗ або зниження напруги.

*Дуговий захист з допомогою дугоуловлювачів і клапанів розвантаження.* Для захисту відсіку збірних шин по торцях секції КРП встановлюються дугоуловлювачі (ДУ). У разі виникнення КЗ у відсіку збірних шин шафи дуга переміщається (не залишаючи ніяких слідів) по збірним шинам убік від джерела живлення. Діставшись до торцевої шафи секції, дуга потрапляє в дугоуловлювач. На даху ДУ встановлений розвантажувальний клапан із кінцевим вимикачем. Клапан під дією надлишкового тиску газів, що утворюються при горінні електричної дуги, відкидається, - спрацьовує кінцевий вимикач, видаючи сигнал на відключення вступного вимикача. Клапанний дуговий захист, як механічний пристрій, реагує не на дугу, а на наслідки дуги, і працюватиме при досягненні тиску газів, достатнього для спрацьовування, тому має визначені недоліки, – зокрема, недостатню чутливість і значний час спрацьовування.

*Дуговий захист на фототиристорах.* В області швидкодіючих захистів від пошкоджень застосовуються захисти, що використовують принцип контролю

світлового потоку Як оптичні датчики застосовуються фототиристори. Фототиристор – це тиристор, переклад якого в стан з високою провідністю здійснюється світловим впливом.

У осередку КРП фототиристори дугового захисту встановлюються по два на одному кронштейні в лінійному (кабельному) відсіку, відсіку вимикача (трансформатора напруги і т. д.) та у відсіку збірних шин в залежності від конструкції КРП, що застосовується. Фототиристори встановлюються таким чином, щоб ними переглядався відсік, що захищається. Дія фототиристорів кабельного відсіку, відсічка вимикача здійснюється на відключення власного вимикача. У разі виникнення КЗ у відсіку збірних шин через фототиристори по шинках дугового захисту подають сигнал на відключення вступного або секційного вимикача.

*Дуговий захист на основі волоконно-оптичних датчиків* . Волоконно-оптичні датчики встановлюються в відсіках високовольтних шаф, мають кругову діаграму спрямованості, фіксують світловий спалах від електричної дуги і передають її по оптичному волокну в блок пристрою детектування світла.

Функціональні і експлуатаційні можливості дугового захисту [4]:

- оптоволоконний датчик для виявлення електричної дуги;
- два швидкодіючих напівпровідникових відключаючих контакти;
- спрацювання по факту наявності тільки світлового сигналу або в поєднанні з швидкодіючої функцією максимального струму;
- повне час спрацювання менше 2,5 мс;
- самоконтроль оптоволоконного датчика.

Рекомендації при монтажі дугового захисту. Дуговий захист повинен надійно не спрацювати при попаданні прямих променів сонячного світла або при запаленні ламп розжарювання потужністю 50 Вт на відстані понад 10 мм [4]. Пуск дугового захисту може дозволятися

(блокуватися) сторонніми факторами (струмом, напругою і т. д.), для чого використовується контакт блокуючого елемента.

На рис. 1.3 наведено приклад розташування дугового захисту на підстанції, що має на боці 6–35 кВ дві секції, які мають з'єднання один з одним секційним вимикачем. З метою мінімізації апаратних витрат на виконання захисту, забезпечення потрібної надійності живлення та швидкодії КРП умовно розділено на кілька зон, при КЗ в яких вплив захисту однаковий. Зона 1 являє собою комірку вступного вимикача; зона 2 – зона збірних шин; зона 3 – секційний вимикач; зона 5 – секційний роз'єднувач; зони 5, 6 – відсіки високовольтного вимикача лінійного осередку, трансформаторів струму та кабельної обробки. При пошкодженні в зоні 1 потрібна дія на вимикач трансформатора. При КЗ в зоні 2 достатньо впливу на вступний  $Q1$  та секційний  $Q2$  вимикачі. Ліквідація КЗ в осередку секційного вимикача (зона 3) вимагає відключення ввідних вимикачів двох ввідів, а при КЗ в зоні 5, тобто в осередку секційного роз'єднувача, достатньо обмежитися відключенням секційного вимикача і найближчого до місця пошкодження вступного вимикача. Відключення КЗ у відсіку лінійного вимикача (зона 5) залежить від типу даного комутаційного апарату.

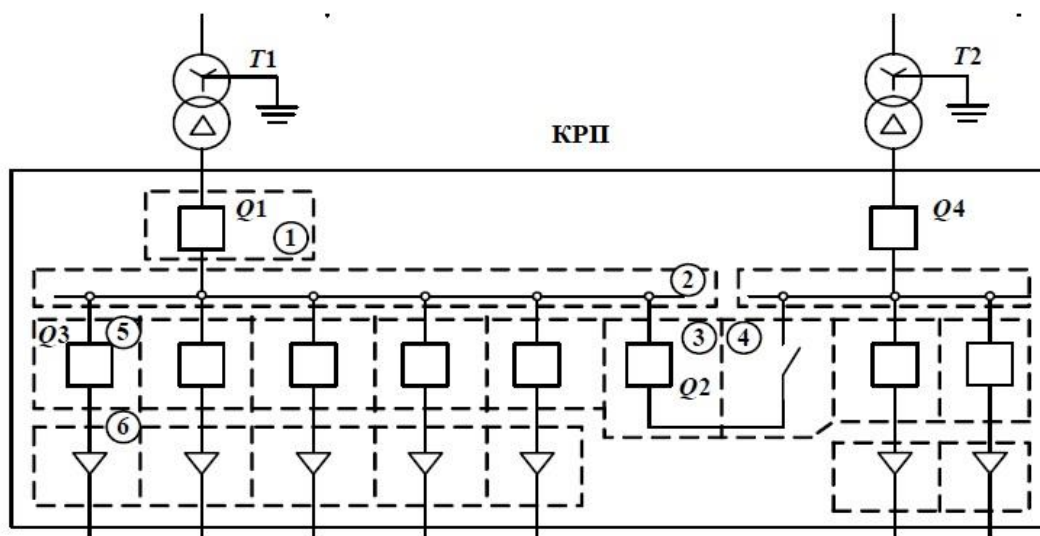


Рисунок 1.3. Варіанти поділу КРП на зони установки оптичних датчиків

При використанні маломасляних вимикачів їх вимикання в цьому випадку недоцільно через можливий вибух повітря- водневої суміші газів і логіка дії при цьому аналогічна логіка ліквідації пошкодження в зоні 2 . При використанні вакуумних вимикачів можливий вплив на нього при КЗ у зоні 5 . Вплив захисту при КЗ в зоні 5 також залежить від конструктивного виконання осередку. У разі наявності оптичного зв'язку зон 5 та 6 практично не представляється можливим через багаторазових відбиттів світлового потоку селективне виявлення пошкодженого відсіку, тобто пропонується вплив на вступний і секційний вимикач. В іншому випадку, коли відсутня можливість попадання світлового потоку з одного відсіку в інший, з метою мінімізації обсягу ушкодження пропонується відключення лінійного вимикача  $Q_3$ .

*Прискорення максимального струмового захисту при вмиканні вимикача.* У цифрових реле передбачається прискорення МСЗ. Прискорення має одну витримку часу 0,5 с та вводиться на час 1,0 с [9]. Відповідно до [1] захист прискорюється, якщо витримка часу МСЗ перевищує 1,0 с. Будь-яких додаткових розрахунків для обґрунтування можливості введення прискорення не потрібно. Витримка 0,5 с забезпечує відбудову ступеня, що прискорюється, від усіх перехідних процесів. Достатнім часом використання даної функції для визначення включення на КЗ можна вважати 1,0 с.

Прискорення застосовують на підстанціях для МСЗ секційного та вступного вимикачів. Воно працює при першому включенні вимикача на КЗ, наприклад, коли на шинах підстанції забувають зняти заземлення після проведення ремонтних робіт.

Приватним випадково прискорення захисту є прискорення до АПВ. Суть прискорення до АПВ в тому, що при КЗ на суміжній лінії воно спочатку неселективно відключається попереднім захистом по ланцюгам прискорення (з меншою витримкою часу), а потім включається від АПВ. Якщо КЗ не

усунулося, то після АПВ захист перемикається на селективний (велику) витримку часу і в надалі пошкодження селективно відключається захистом, найближчою до місця ушкодження.

## **1.2 Умови узгодження струмових захист за струмом та за часом**

Для розрахунку уставок струмових захистів за струмом і за часом необхідно знати похибку і розкид уставок застосовуваних реле.

Похибкою спрацьовування реле, яка виражається в процентах, вважається відношення найбільшої різниці між виміреної величиною і уставкою по шкалі до уставці за шкалою.

Розкидом спрацьовування реле вважається ставлення найбільшим різниці між виміряними величинами спрацьовування до половини суми цих величин. Розкид виражається у відсотках або в іменованих величинах.

Похибка по струму спрацьовування максимальних реле непрямої дії має бути не більше  $\pm 5\%$ , а розкид – не більше  $\pm 5\%$  для миттєвих реле та реле із залежною характеристикою всіх типів. Похибка по струму спрацьовування відсічки, вбудованої в залежні реле, має бути не більше  $\pm 30\%$ , розкид - не більше  $\pm 15\%$ .

Для реле часу з годинниковим механізмом (серія РВ) розкид визначається як різниця між максимальним та мінімальним виміром часом при 10 вимірах і складає від 0,05 до 0,5 с [1].

Для практичних розрахунків уставок основну роль грає розкид реле по струму або напруги спрацьовування і по часу. В багатьох випадках доводиться враховувати і похибки вимірювальних трансформаторів, особливо в розподільчих мережах, де часто застосовуються ТС малої потужності.

Крім цього необхідно враховувати помилки при вимірі струмів спрацьовування, залежать від класу точності застосовуваних приладів, умов вимірювань та індивідуальних якостей перевіряючого. Рекомендується для налаштування захистів застосовувати прилади класу точності не менше 0,5.



Для практичних розрахунків усі зазначені вище відхилення дій- існих струмів спрацьовування реле від розрахункових враховуються коефективністю надійності  $K_n$ , що показує, наскільки струм спрацьовування захисту, встановлений ближче до джерела живлення, повинен бути більше струму спрацьовування захисту, встановленою ближче до місцю КЗ.

Для визначення  $K_n$  приймаються найважчі умови, коли струм спрацьовування захисту  $I_{сз1}$ , що стоїть ближче до місця КЗ, зменшується, а струм спрацьовування захисту  $I_{сз2}$ , що стоїть ближче до джерела живлення, збільшується [1].

$$I_{сз2} = 1,2 I_{сз1} . \quad (1.1)$$

Для узгодження між собою цифрових захистів рекомендується приймати коефіцієнт

$$K_n = 1.1. \quad (1.2)$$

Для реле зі ступінчастим регулюванням струму спрацьовування величина  $K_n$  приймається

$$I_{сз2} = 1,5 I_{сз1} . \quad (1.3)$$

Узгодження послідовно включених захистів за часом визначається за рівнянням

$$t_{спр.б} = t_{спр.м} + t_{відк.м} + t_{роз.б} + t_{роз.м} + t_i + t_{зап}, \quad (1.4)$$

де  $t_{спр.б}$  і  $t_{спр.м}$  - значення часу спрацьовування захисту з великим і меншим часом спрацьовування;  $t_{відк.м}$  - повний час відключення КЗ вимикачем від подачі оперативного струму в електромагніт відключення до закінчення гасіння дуги з урахуванням розкиду за часом у  $\pm 10\%$ ;  $t_{роз.б}$  і  $t_{роз.м}$  - час розкиду за часом захисту з більшим і меншим часом спрацьовування;  $t_i$  - час інерційного вибігу реле, що дорівнює часу, протягом якого реле може замкнути свої контакти після припинення струму в його обмотці (враховується тільки для індукційних реле);  $t_{зап}$  -

час запасу.

Ступінь селективності  $\Delta t$  – це мінімально можлива різниця між часом спрацьовування суміжних захистів, що враховує точність роботи реле. Для захисту, виконаних на електромеханічній базі, ступінь селективності  $\Delta t$  складає 0,5-0,7 с [11]. Мікроелектронні та мікропроцесорні захисти дозволяють забезпечити ступінь селективності, що дорівнює 0,2-0,3 с. Різниця між часом спрацьовуваннями суміжних захистів  $\Delta t$  дорівнює

$$\Delta t = t_{\text{спр.б}} - t_{\text{спр.м}} = t_{\text{відк.м}} + t_{\text{роз.б}} + t_{\text{роз.м}} + t_i + t_{\text{зап}} \quad (1.5)$$

Для захистів з електромагнітними реле часу типу РВ і шкалою до 3,5 с

$$\Delta t = t_{\text{відк.м}} + t_{\text{роз.б}} + t_{\text{роз.м}} + t_i + t_{\text{зап}} = 0,15 + 0,12 + 0,12 + 0 + 0,1 = 0,49 \text{ с,}$$

тобто. приблизно  $\Delta t = 0,5$  с.

Для захисту з цифровими реле та вакуумними або елегазовими вимикачами

$$\Delta t = t_{\text{відк.м}} + t_{\text{роз.б}} + t_{\text{зап}} = 0,03 + 0,025 + 0,1 = 0,155 \text{ с,}$$

т. б. приблизно  $\Delta t = 0,2$  с.

Для захистів з цифровими реле попереднього і наступного комплектів захисту з залежними або незалежними характеристиками ступінь селективності за часом приймається  $\Delta t = 0,2$  с, а при узгодження часу спрацьовування цифрових захистів з іншими захистами сходінка селективності по часу приймається  $\Delta t = 0,3$  с [2].

Необхідно пам'ятати, що витримка часу захисту завжди задається на виході повної схеми захисту від моменту виникнення КЗ до замикання ланцюга електромагнітного відключення.

### **1.3 Розрахунок установок максимальних струмових захистів від міжфазних коротких замикань**

*Розрахунок уставок східчастих струмових захистів* рекомендується починати з найбільш чутливого ступеня, т. б. з МСЗ.

Розрахунок струму спрацьовування МТЗ проводиться та перевіряється по трьом умовам:

1. Неспрацьовування захисту АК2 при надструмах після аварійних перевантажень, тобто після відключення КЗ на попередньому елементі (рис. 1.4). За цією умовою струм спрацьовування МТЗ вибирається за виразом

$$I_{с.з} \geq \frac{K_H}{K_{пов}} K_{с.зап} I_{роб.макс}, \quad (1.6)$$

де  $K_H$  - коефіцієнт надійності неспрацьовування захисту, який враховує похибку і необхідний запас. Коефіцієнт надійності при розрахунках приймається: для цифрових реле  $K_H = 1,1$ ; для реле РТ-40, РТ-80 та РСТ –  $K_H = 1,2$ ;  $K_{пов}$  - коефіцієнт повернення максимальних реле струму. Коефіцієнт повернення при розрахунках приймається: для цифрових реле  $K_{пов} = 0,95-0,96$ ; для реле РСТ –  $K_{пов} = 0,9$ ; для реле РТ-40, РТ-80 –  $K_{пов} = 0,8$ ;  $K_{с.зап}$  - коефіцієнт самозапуску навантаження, відбиваючий збільшення робочого струму  $I_{роб.макс}$  за рахунок одночасного пуску електродвигунів, які загальмувалися при зниженні напруги під час КЗ [1,2]. Для загальнопромислового навантаження  $K_{с.зап}$  приймається рівним 1,8-2,5, для побутового навантаження приймається  $K_{с.зап} = 1,1-1,3$ , а для сільськогосподарських споживачів приймається  $K_{с.зап} = 1,1-1,15$ .



Рисунок 1.4. Розрахункова схема для вибору уставок максимальних струмових захистів

Максимальні значення коефіцієнта самозапуску при значній частці електрорухового навантаження визначаються розрахунком для конкретних

умов, але обов'язково при найважчій умові пуску повністю загальмованих електродвигунів, маючи на увазі, що до моменту самозапуску опір двигуна вважається рівним надперехідному опору загальмованого двигуна.

При наявності високовольтних двигунів 6(10) кВ значення  $K_{с.зап}$  визначається розрахунком. В цьому випадку необхідно враховувати пускові струми електричних двигунів. Якщо підстанція не обладнана спеціальними пристроями, що забезпечують груповий або почерговий самозапуск двигунів при короткочасній втраті живлення, то за максимальне навантаження з обліком коефіцієнта  $K_{с.зап}$  приймається режим пуску одного електричного двигуна при максимальній (реально можливому) кількості включених приєднань

$$K_{с.зап} I_{роб.макс} = \frac{U_{нн}}{\sqrt{3}(x_{наван.сум} + x_{екв})}, \quad (1.7)$$

де

$$x_{екв} = \frac{x''d \cdot \kappa x_{наван.сум}}{x''d + \kappa x_{наван.сум}}; x_{нн.мін}$$

мінімальне опір джерела живлення (система плюс трансформатор), приведенного до шин сторони НН;  $x_{екв}$  - еквівалентне опір загальмованого двигуна з опором  $x''d$  і сумарного навантаження, приєднаного із опором  $x_{наван.сум}$ ;  $\kappa$  – коефіцієнт збільшення струму навантаження за рахунок провалу напруги, викликаного пуском електричних двигунів, котрий приймається рівним 0,8-0,9 [5].

Максимальне значення робочого струму елемента, що захищається  $I_{роб.макс}$  визначається з урахуванням його допустимого навантаження. Наприклад, для масляних трансформаторів з первинною напругою 6(10) кВ потужністю до 630 кВ·А допускається навантаження до 1,6–1,8 номінального струму, для сухих трансформаторів допускається перевантаження до 1,25 номінального струму для трансформаторів з первинною напругою 110 кВ до 1,4 -1,6. Якщо максимальне значення робочого струму навантаження не відомо, то його

можна прийняти рівним довго допустимому струму кабельної або повітряної лінії, яка живить це навантаження.

2. По другій умові узгодження чутливості захистів наступного (захищеного) та попереднього елементів (рис. 1.4) струм спрацювання наступного захисту вибирається за виразом

$$I_{с.з.посл} \geq K_{н.с} (I_{с.з.попер} + \sum I'_{роб.макс}) , \quad (1.8)$$

де  $K_{н.с}$  - коефіцієнт надійності узгодження, значення якого залежить від типу пускових реле і приймається рівним 1,1 при узгодженні захисту з мікропроцесорними реле, а при реле типу РТ-40, РСТ, РТ-80 і т.п. приймається рівним 1,2;  $I_{с.з.попер}$  – найбільше значення струму спрацювання МСЗ попередніх елементів, із якими виробляється узгодження;  $\sum I'_{роб.макс}$  – геометрична сума максимальних значень робочих струмів усіх попередніх елементів, крім тих, із захистами яких виробляється узгодження [5].

При приблизно однорідному навантаженні допустимо арифметичне додавання замість геометричного, що створює певний розрахунковий запас.

За розрахунковий струм спрацювання МТЗ приймається значення найбільшого струму з умов (1.6) та (1.8).

Таким чином, уставка по струму МСЗ попереднього елемента повинна завжди бути більшою за уставку МТЗ наступного елемента, що частково забезпечує так звану струмову селективність, маючи на увазі різні струми спрацювання захистів.

3. *Забезпечення достатньої чутливості при КЗ наприкінці елемента, що захищається (основна зона) і в кінці кожного з попередніх елементів (зона далекого резервування).*

Для виконання цієї умови необхідно знати значення мінімальних струмів КЗ в кінці елемента, що захищається, наприклад,  $I_{к2}$  і в кінці зони резервування  $I_{к1}$ . Визначення коефіцієнтів чутливості захисту, наприклад, АКЗ (див. рис. 1.5) провадиться за виразами:

$$K_{ч.о} = I_{к2.мін} / I_{с.з.3} ; K_{ч.р} = I_{к2.мін} / I_{с.з.3} , \quad (1.9)$$

де  $K_{ч.о}$ ,  $K_{ч.р}$  – коефіцієнти чутливості захисту відповідно в основній та резервній зонах;  $I_{к1мін}$ ,  $I_{к2мін}$  – мінімальні (зазвичай двофазні) струми КЗ. При визначенні значення цих струмів необхідно враховувати вид і місце КЗ, а також можливі мінімальні режими роботи енергосистеми живлення, при яких струми КЗ мають найменші значення.

Мінімальні значення коефіцієнта чутливості захисту повинні бути не менше значень, потрібних [1]. Для МСЗ вони повинні бути не менше 1,5 при КЗ в основній зоні захисту і не менше 1,2 при КЗ в зонах далекого резервування, тобто на попередніх (нижчих) елементах.

Після виконання трьох вищезгаданих умов визначається струм спрацьовування реле (вторинний)  $I_{с.р}$ , який встановлюється на реле. Значення цього струму у загальному випадку розраховується за виразом

$$I_{с.р} = I_{с.з} K_{с.х} / K_I , \quad (1.10)$$

де  $I_{с.з}$  – струм спрацьовування захисту (первинний);  $K_I$  – коефіцієнт трансформації ТС;  $K_{с.х}$  - коефіцієнт схеми з'єднання вторинних обмоток трансформаторів струму та реле. При застосуванні схеми повної чи неповної зірки  $K_{с.х} = 1$ , при застосуванні схеми різниці струмів двох фаз  $K_{с.х} = \sqrt{3}$  .

За значенням  $I_{с.р}$  вибирають тип електромеханічного реле РТ-40 або РСТ залежно від меж регулювання уставок, або цифрове реле.

Слід зазначити, що деякі типи цифрових реле, наприклад Seram 2000, уставка виставляється у первинних струмах, а коефіцієнт трансформації ТС заздалегідь заноситься в пам'ять реле. Коефіцієнт схеми  $K_{с.х}$  під час використання цифрових реле дорівнює одиниці, оскільки трансформатори струму на вході реле завжди входять у повну чи неповну зірку.

*Вибір часу спрацьовування МСЗ.* Витримка часу МСЗ вводиться для уповільнення дії захисту з метою забезпечення тимчасової селективності дії захисту наступного елемента. Для цього час спрацьовування захист наступної

лінії вибирається більше часу спрацьовування захисту попередньої лінії

$$t_{\text{с.з.наст}} = t_{\text{с.з.попер}} + \Delta t, \text{ с}, \quad (1.11)$$

де  $\Delta t$  – ступінь селективності, с.

Величина  $\Delta t$  визначається за виразом (1.5) і складається з наступних доданків: часу відключення вимикача  $t_{\text{в.о}} = (0,05-0,1 \text{ с})$ ,  $t_{\text{р.з}}$  - часу дії релейного захисту приймається для цифрових реле  $t_{\text{р.з}} = 0,25 - 0,05$ ; для реле РТ-40, РСТ -  $t_{\text{р.з}} = 0,1 \text{ с}$ ; похибки за часом наступного та попереднього захисту (3–5 %) та необхідного запасу (0,05–0,1 с) [13].

Основним недоліком МТЗ є накопичення витримок часу, особливо суттєве для головних елементів багатоступеневих електричних мережах. При наближенні точки КЗ джерела живлення значення струмів КЗ збільшуються. Наприклад, при КЗ у точці К (див. рис. 1.5) захист АК1 відключить пошкодження за мінімальний час, а захисту АК2 та АК3 не працюватимуть, оскільки вони мають більшу витримку часу, ніж захист АК1. Для подолання цього недоліку використовуються цифрові пристрої захисту, що дозволяють знизити рівні селективності до  $\Delta t = 0,2 \text{ с}$  за умови, що на суміжних лініях використовуються такі ж цифрові захисту та однотипні вакуумні або елегазові вимикачі. Якщо узгодження йде між цифровими та електромеханічними захистами, то приймається  $\Delta t = 0,3-0,4 \text{ с}$  [1]. За узгодження часових характеристик МР з показниками запобіжників рекомендується приймати ступінь селективності 0,3 с. Для захисту з ідукційними реле, що мають залежну характеристику часу спрацьовування (РТ-80, РТ-90), приймається  $\Delta t = 0,5 \text{ с}$  [4].

### Висновки по першому розділу

Суттєве зниження часу відключення КЗ досягається шляхом використання струмових захистів із залежними від струму характеристиками. При тому самому значенні струму КЗ, що проходить через два суміжні захисти з різними струмами спрацьовування, ці захисти мають різний час

спрацьовування через різну кратність струму в їх вимірювальних органах.

Використання залежних характеристик реле дозволяє краще узгодити час дії наступного релейного захисту з попереднім захистами, що мають також залежну характеристику.



## РОЗДІЛ 2

### ПОБУДОВА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

#### 6 – 35 кВ з функціями попереджень пошкоджень

##### 2.1 Захист від замикань на землю в мережах 6-35 кВ

Мережі напругою 6-35 кВ працюють з ізольованою або компенсованою через дугогасильний реактор нейтралі. Тому значення ємнісних струмів однофазного замикання на землю (ЗЗ) невеликі, вони не перевищують 5–30 А [3]. Як правило, при ЗЗ не потрібно негайного відключення пошкодженого приєднання, а необхідно вжити заходів щодо переведення навантаження на резервне джерело, а потім вимкнути пошкоджену лінію. Необхідно пам'ятати, що у разі дугового ЗЗ на одному з приєднань у всій електрично зв'язаній мережі виникають небезпечні перенапруги (до  $4,2U_{\phi}$ ), що впливають на ізоляцію електроустановок.

Ця одна з головних причин виходу з ладу високовольтного обладнання, підключеного до мережі 6-10 кВ, особливо електродвигунів.

Відповідно до [3] для селективного виявлення однофазних замикань на кожному приєднанні має бути встановлений захист від замикань на землю (захист нульової послідовності), який в одних випадках діє на сигнал, в інших - на відключення. Зокрема, на тих електродвигунах, у яких ємнісний струм замикання на землю перевищує 5 А (первинних), захист має діяти на відключення без уповільнення.

##### 2.1.1. Принципи побудови схем захисту від замикань на землю у мережах 6–35 кВ.

Ознаки, якими можна відрізнити пошкоджену лінію від неушкодженої, такі [3]:

- величина струму нульової послідовності ( $3I_0$ ) в непошкодженій лінії менше, ніж у пошкодженій;
- напрям вектора струму  $3I_0$  у пошкодженій та непошкодженій лініях протилежний.

На практиці застосовують два види захисту від замикання на землю: ненаправлений (за 1-ою ознакою) та спрямований (за 2-ою ознакою).

Ненаправлений струмовий захист реагує на повний струм нульової послідовності і призначений для радіальних мереж.

Для виділення ємнісного струму із загального струму навантаження лінії застосовують фільтр струму нульової послідовності (рис. 2.1 а). Істотним ускладненням є те, що струм замикання землі має малу величину.

Для захисту від замикань на землю використовують спеціальні трансформатори струму нульової послідовності типу ТЗЛ, ТЗР, які можна застосувати лише за наявності кабельного виведення з комірки (рис. 2.1 б). Вимірювальні органи цифрових пристроїв мають високу чутливість та мале споживання ( $I_{cp} = 0,05 \text{ А}$ ,  $S_{спож} = 0,01 \text{ В} \cdot \text{А}$ ). Це дозволяє не досягати найвищої віддачі потужності від ТНП.

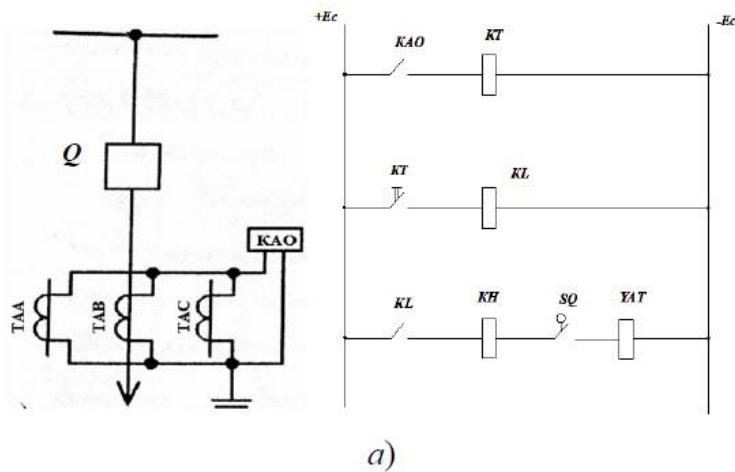
Для кабельних ліній виготовляються ТНП типу ТЗ з нероз'ємним магнітопроводом, що надягає на кабель до монтажу воронки, а також типу ТЗР і ТФ з роз'ємним магнітопроводом, які можна встановлювати на кабелях, що знаходяться в експлуатації без зняття кабельної лійки. Конструкція кабельного ТНП показано на рис. 2.1, б.

При проходженні струмів по оболонці непошкодженого кабелю, охопленого ТНП, у реле КА ЗЗ з'являється струм, від якого релейний захист може неправильно вплинути. Ці струми з'являються при замикання на землю поблизу кабелю або під час роботи зварювальних апаратів. Для виключення хибної роботи релейного захисту необхідно компенсувати вплив блукаючих струмів, що замикаються по провідній оболонці та броні кабелю. З цією метою лійка та оболонка кабелю на ділянці від лійки до ТНП ізолюються від землі (рис. 2.1), а заземлюючий провід приєднується до лійки кабелю та пропускається через вікно ТНП. При такому виконанні струм, що проходить по броні кабелю, повертається по заземлюючому проводу, тому магнітні потоки в магнітопроводі ТНП від струмів у броні та проводі взаємно

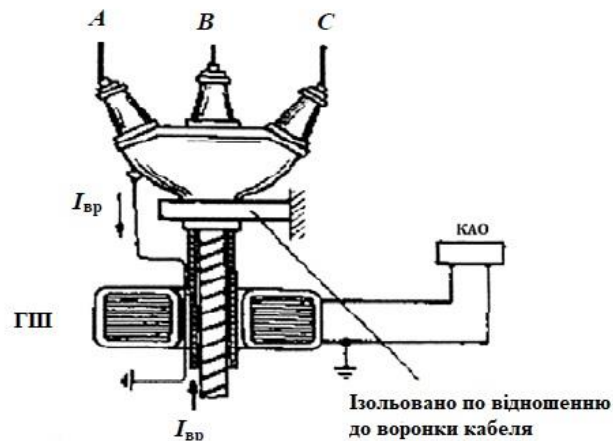
знищуються. При цьому магнітопровід ТНП має бути надійно ізольований від броні кабелю.

Для розгалужених мереж із ізолюованою нейтраллю, де ємностний струм одного фідера значно менше загального ємнісного струму, як ЗЗ можна застосувати струмовий захист високої чутливості. Такий захист є в мікропроцесорних струмових пристроях захисту. При малій протяжності кабелів у мережі, або, якщо кабелі різної довжини і струм в одному кабелі можна порівняти із загальним струмом замикання на землю, потрібно застосувати спрямований захист нульової послідовності.

Виконати досить чутливу ненаправлену захищеність можна лише в тому випадку, якщо значення  $\Sigma I_c$  перевищує величину  $I_{c,пр}$  більш як 5 раз. Тобто такий захист можна застосувати лише у досить розгалуженій електричній мережі. В іншому випадку застосовують спрямований ЗЗ.



a)



б)

Рисунок 2.1. Ненаправлений струмовий захист з використанням фільтра струмів нульової послідовності (а) та з використанням кабельного ТНП (б)

Захисти струму нульової послідовності, що підключаються до трансформаторів струму нульової послідовності вітчизняного виробництва, не можна налаштовувати безпосередньо виставляючи уставку в реле. Коефіцієнт трансформації цих трансформаторів різко змінюється залежно від навантаження через їхню малу потужність. На уставку впливає навіть опір з'єднувальних проводів. Тому налаштування ведеться за первинним струмом, що подається через провід, пропущений через зазор ТНП. У розрахунках можна прийняти коефіцієнт трансформації ТНП 25 [5].

## 2.2. Вибір струму спрацьовування ненаправленого захисту ЗЗ.

Ємнісні опори елементів електричної системи значно перевищують їх індуктивні та активні опори, що дозволяє знехтувати струмом замикання на землю і, отже, вважати, що величина цього струму практично не залежить від місця замикання в мережі.

Крім того, струм замикання на землю відносно малий і тому можна вважати, що напруга джерела завжди залишається незмінною.

Найбільша величина струму замикання на землю буде при металевому замиканні, тобто при  $R_{\text{п}} = 0$  і при цьому замикання на землю в 3 рази перевищує ємнісний струм на землю однієї фази в нормальних умовах.

Уставка струму захисту від замикання на землю розраховується за умовою неспрацьовування захисту від власного ємнісного струму даного приєднання (лінії або електродвигуна) за виразом

$$I_{\text{с.з.}} \geq K_{\text{від}} \cdot K_{\text{кид.}} \cdot I_{\text{с.пр}} , \quad (2.1)$$

де  $K_{\text{від}}$  - коефіцієнт відбудови, що приймається рівним 1,2;  $K_{\text{кид.}}$  - коефіцієнт, що враховує кидок ємнісного струму в останній момент виникнення ОЗЗ - для реле типу РТЗ-51  $K_{\text{кид.}} = 2,0-3,0$ ; - для цифрових реле  $K_{\text{кид.}} = 1,0-1,5$ ;  $I_{\text{с.пр}}$  - максимальне значення власного ємнісного струму приєднання, що захищається при зовнішньому КЗ.

Вибраний (2.1) струм спрацьовування захисту необхідно перевірити за умовою чутливості:

$$K_{\text{ч}} = (\sum I_{\text{с}} - I_{\text{с.пр}}) / I_{\text{с.з}} \geq 1,2 - 1,5, \quad (2.2)$$

де  $\sum I_{\text{с}}$  - сумарний ємнісний струм всіх приєднань даної електричної мережі, з обліком можливого відключення одного з них на ремонт.

**Вибір параметрів спрацьовування спрямованої захисту ЗЗ.** У радіальних мережах, коли власні ємнісні струми окремих приєднань великі і співмірні з повним струмом мережі ненаправлений струмовий захист невикористовується. Тому застосовують спрямований струмовий захист. Такий захист входить в пристрої МіСОМ Р 125-127, БМРЗ, Sepam 2000 та в захист ЗЗП-1М та ЗЗН [11].

Визначити напрямок струму  $3I_0$  можна, якщо його вектор порівняти з якимось вектором базової величини, в якості якого прийнятий для всіх ліній вектор напруги нульової послідовності  $3U_0$  одержуваний від обмотки розімкнутого трикутника трансформатора напруги типу НТМІ або НАМІТ. У непошкоджених лініях протікають власні ємнісні струми, тому вектори струмів  $3I_0$  неушкоджених лініях випереджають вектор напруги  $3U_0$  на  $90^\circ$ . Отже, вектор струму  $3I_0$  у пошкодженій лінії відстає від вектора  $3U_0$  на  $90^\circ$ . Тому в аналогових реле типів ЗЗП-1М та ЗЗН застосовується вимірювальний орган напрямку потужності нульовий послідовності з кутом максимальною чутливості рівного  $+90^\circ$ . Спрямований захист застосовується в мережах зі струмами замикання на землю більше 0,5 А (первинних) і у разі недостатньої чутливості ненаправленою захисту [11].

В якості уставок спрямованого захисту в цифрове реле вводяться наступні параметри [12]:

- значення напруги  $3U_0 = 15-20$  В для відбудови від небаланса фільтра напруги нульовий послідовності;
- характеристичний кут  $\varphi_{\text{м.ч}} = +90^\circ$ ;

– витримка часу спрацювання; для електродвигунів вибирається  $t_{c.з}=0,1$  с, але допускається  $t_{c.з} = 0,5$  с у разі застосування лінійних трансформаторів струму в трьох фазах.

Уставка по струму вибирається за умовою забезпечення гарантійного коефіцієнта чутливості, рівного 2.

$$I_{c.з} = (\sum I_c - I_{c.пр}) / 2. \quad (2.3)$$

Значення  $I_{c.з}$  повинно бути прийнято більше 0,3 А (первинних), інакше може статися неселективне спрацювання цифрового реле при зовнішніх замикання на землю.

### **Висновки по другому розділу**

У мережах напругою 6-35 кВ які працюють з ізольованою або компенсованою через дугогасильний реактор значення ємнісних струмів однофазного замикання на землю (ЗЗ) невеликі, і вони не перевищують 5–30 А. Як правило, при ЗЗ не потрібно негайного відключення пошкодженого приєднання, а необхідно вжити заходів щодо переведення навантаження на резервне джерело, а потім вимкнути пошкоджену лінію.

## РОЗДІЛ 3

### АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ ПОБУДОВИ РЕЛЕЙНИХ ЗАХИСТІВ ЯКІ ОБ'ЄДНУЮТЬ РІЗНІ ФУНКЦІЇ

#### 3.1 Побудова релейного захисту електроустановок 6 – 10 кВ з функціями попередження пошкоджень які розвивається

Переважає більшість електричних мереж напругою 6-10 кВ працюють в режимі з ізольованою нейтраллю. Як відомо, в мережах з ізольованою нейтраллю замикання фази на землю не є коротким замиканням і не вимагає негайного відключення. [3] Це дозволяє зберегти мережі в роботі при тривалих замиканнях фази на землю шляхом визначення, виділення і відключення місця ушкодження. Однофазні замикання на землю (ОЗЗ) за місцем виникнення можна розділити на дві групи: зовнішні ОЗЗ, які виникають, кабельних і повітряних лініях що відходять від КРУ і внутрішні ОЗЗ, виникаючі на шинах, шинних мостах комплектних розподільчих пристроїв і в відсіках високовольтних вимикачів осередків (рис.3.1).

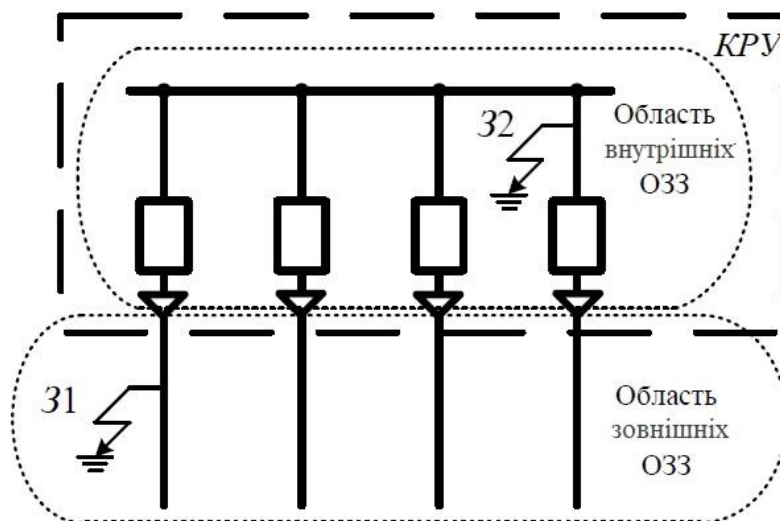


Рисунок 1 - Области виникнення замикань на землю в електроустановки 6-10 кВ

У даний час в більшості випадків на захисти від ОЗЗ покладаються функції неселективної сигналізації, або ж функції виявлення пошкодженого приєднання з дією на його вимкнення. При цьому виявленню ОЗЗ у осередках КРУ та на шинах не приділяється увага. Більшість сучасних захистів від ОЗЗ

виконані в вигляді окремих децентралізованих пристроїв, встановлюваних в релейних відсіках осередків які підключаються до трансформаторам струму нульовий послідовності  $TA_N$  (рис. 3.2). Таке виконання не дозволяє увімкнути в область шини, що захищається захистом, шинних мостів комплектних розподільчих пристроїв та відсік високовольтного вимикача комірки, тому замикання в цій галузі для всіх пристроїв захисту буде внутрішнім. Наприклад, при ОЗЗ на кабельному обробленні, до місця встановлення трансформатора струму нульової послідовності  $TA_N$  (Рис. 3.2). При цьому пошкодженні захист розглянутого приєднання від ОЗЗ не спрацює, т.я. струм нульової послідовності протікає від збірних шин до місця замикання, потрапляючи в трансформатор струму  $TA_N$ . [6].

При ОЗЗ існує можливість виникнення переміжних дугових замикань на землю, які супроводжуються великою кратністю перенапруг на елементи мережі. Спільний вплив заземлюючої дуги та перенапруг створює дуже важкі умови для роботи ізоляції. Термічна дія дуги і вплив перенапруг часто переводять однофазні замикання на землю в багатofазні короткі замикання або багатомісні пробої ізоляції на ушкодженій фазі. За даними досвіду експлуатації 60-80% однофазних замикань мережах 6-10 кВ розвиваються в міжфазні короткі замикання, в тому числа, супроводжувані електричної дугою (ДКЗ) або багатомісні пробої ізоляції [9].

Вплив електричної дуги характеризується потужним руйнівним впливом, що визначається швидким розігрівом повітряної маси в зоні дії дуги до 15000 К і більше, що викликає значне руйнування обладнання і небезпека поразки персоналу енергооб'єкта.

Аварійний режим (ДКЗ) можливо запобігти у ряді випадків, в тому числі, при визначенні розвиваючого дефекту ізоляторів і провідників. При цьому необхідним є контроль рівня ізоляції струмопровідних частин та виявлення однофазних замикань на землю (ОЗЗ) всередині енергооб'єкта. Для цих цілей необхідно використовувати пристрої зі спеціальними алгоритмами



функціонування, які забезпечать максимальну швидкодiю, селективнiсть виявлення пошкодженої дiлянки, високу чутливiсть та надiйнiсть. Дане завдання є актуальним на пiдприємствах енергетичної сфери та сумiжних з ними областей.

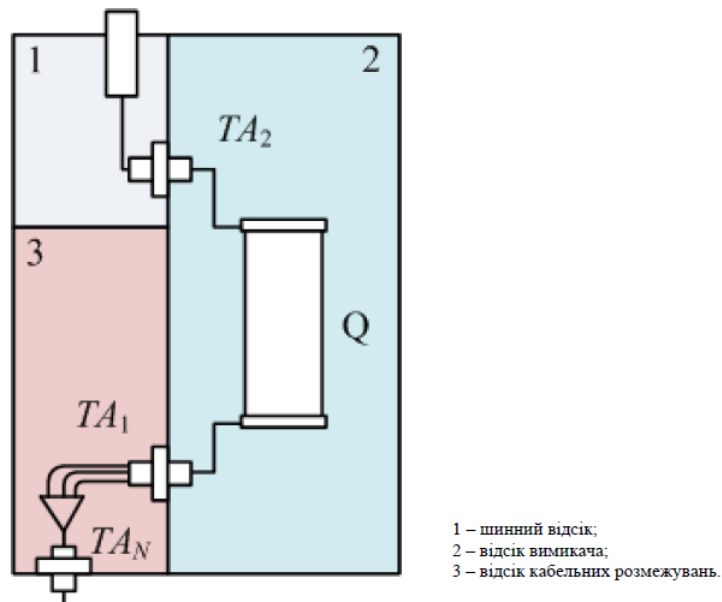


Рисунок 3.2 - Схема установки вимірювальних трансформаторів струму в середині відсіків комірки

У сучасних умовах, при наявності доступних і надійних мікропроцесорів, стає можливим створення пристрою релейного захисту, об'єднуючого функції як швидкодіючого захисту від ДКЗ, так і функції контролю рівня ізоляції струмопровідних частин та виявлення ОЗЗ у середині енергооб'єкта [13]. Вказаний захист повинен мати абсолютну селективність і реагувати на виникнення аварійних режимів в відповідно зі ступенем його небезпеки. При виникненні ОЗЗ має бути визначено місце пошкодження та вжито заходів щодо його локалізації та/або ліквідації. При виникненні міжфазного короткого замикання або надалі розвитку ОЗЗ пошкоджений елемент енергооб'єкта повинен бути швидко відключено.

У даний час існує кілька варіантів побудови захистів, діючих селективно при замиканнях на землю на комплектних шинних мостах розподільних пристроїв та у відсіках високовольтного вимикача осередку (див. таблицю 3.1).

Таблиця 3.1- Алгоритми функціонування та функціональні можливості захисту від ОЗЗ

1	Тип захисту	Визначення замикань		Алгоритм функціонування	Примітка
		на шинах	на лініях		
2	3	4	5	6	
1.	Струмовий максимальний	-/+	+	$F_i = 1$ при $I_{0i} > I_{уст}$ $F_{стр\text{о}м\text{р}} = U_0 \cdot \prod \bar{I}_{0i}$	Можливе виявлення замикань на шинах при неспрацьованні не одного із органів струму.
2.	Струмовий направлена	+	+	$F_i = M_i$ при $I_{0i} > I_{уст}$ $F_{стр\text{о}м\text{р}} = U_0 \cdot \prod \bar{M}_{0i}$	
3.	Диференціальний струмовий	+	-	$F_{стр\text{о}м\text{р}} = \left  \sum \dot{I}_{0i} \right  > I_{уст}$	Неможливість визначення пошкодженого приєднання по принципу дії.
4.	Струмовий відносних вимірів	-	+	$F_i = 1$ при $I_{0i} > I_{0j \neq i}$	Спрацьовує на трьох і більше приєднаннях. Можливі надлишкові спрацьовання при пошкодженнях на шинах.
5.	Струмовий з накладанням сигналів	-/+	+	$F_i = 1$ при $I_{0i} > I_{0j \neq 1}$ $F_{стр\text{о}м\text{р}} = U_0 \cdot \prod \bar{I}_{0i}$	Можливе виявлення замикань на шинах при неспрацьованні не одного із органів струму.

Самий простим захистом є максимальний струмова захист на основі локальних пристроїв. Цьому захисту властивий ряд недоліків: недостатня чутливість при замиканні в мережах на приєднаннях, порівнянних по протяжності з сумарною протяжністю решти ліній, підключених до шин, непрацездатність при внутрішніх замиканнях на землю. Останнє може бути усунено при контролі всіх органів струму.

Подібний ефект може бути досягнуто при побудові захисту з використанням диференціального принципу, коли при внутрішніх і зовнішніх ушкодженнях справедливі співвідношення:

$$\sum I_{0i} \geq I_{уст} - \text{при внутрішньому замиканні (К1), } \sum I_{0i} \leq I_{уст} - \text{при зовнішньому}$$

(K2).

Токові спрямовані захисту також можуть селективно діяти при внутрішніх замиканнях. Принцип визначення внутрішніх ушкоджень в таких видах захистів представлений наступним чином:  $F_{\text{внутр}} = U_0 \cdot \prod_{i=1}^n \bar{M}_{0i}$  [6].

По напрямку потужності на кожному приєднанні визначається зона ушкодження. Напрямок потужності до шин по всіх приєднаннях свідчить про внутрішнє замикання. При наявності одного приєднання з напрямком потужності від шин до лінії замикання є зовнішнім і відключається захистом на пошкоджені приєднання.

Іншим принципом побудови захистів з селекцією внутрішніх ушкоджень є принцип відносного виміру струмів відходять від секції шин приєднань. При внутрішньому замиканні на землю по всіх приєднаннях протікає тільки струм, обумовлений власною ємністю приєднання, на відміну від зовнішнього замикання, коли по пошкоджені приєднання протікає струм, обумовлений ємністю усієї мережі, крім власної ємності приєднання. Таким чином, можливо зайве спрацювання захисту приєднання з найбільшим струмом при внутрішніх ушкодженнях. Виділення віртуального приєднання дозволяє уникнути зайвого спрацювання і виявляти внутрішні замикання на землю.

Використання принципу накладання сигналів на мережу яка захищається, дозволяє забезпечити виявлення зовнішніх пошкоджень незалежно від режиму нейтралі мережі, але, також як і інші принципи побудови, невільний від відмови при внутрішніх ушкодженнях. Контроль неспрацювання всіх вимірювальних органів струму дозволяє забезпечити селективне виявлення внутрішніх ушкоджень.

Своєчасне виявлення внутрішнього ОЗЗ і відключення пошкоджені елемента дозволяє запобігти розвиток замикання в міжфазне, що супроводжується електричною дугою. Водночас воно не виключає можливості виникнення в КРУ міжфазних ДКЗ, селективне виявлення і відключення яких має виконуватися захистом, що володіє швидкодіючими

функціями захисту від ДКЗ.

Ступінь і розміри ушкодження від ДКЗ обладнання, що знаходиться всередині розподільчих пристроїв, залежать від двох факторів: величини струму короткого замикання на збірних шинах РУ та часу відключення пошкодження. Пошкодження окремих елементів шафи КРУ (ізолятор, пружний контакт, кабельний наконечник та ін), як правило, супроводжуються відкритою електричною дугою. Практика і численні випробування [4], показують, що якщо час відключення такого пошкодження не перевищує 0,25 с навіть при струмах КЗ 10-15 кА, то руйнується лише дефектний елемент і ушкоджень інших елементів і сусідніх шаф не відбувається. При великих значеннях часу відключення і тих же струмах, що виникає відкрита електрична дуга переміщається всередині шафи та викликає пошкодження обладнання, в тому числі в сусідніх осередках та на збірні шини.

Селективне виявлення пошкодженого приєднання є складним завданням. Основні інформаційні ознаки ДКЗ представлені в таблиці 3.2. Функції захисту від ДКЗ можуть бути реалізовані на різних принципах. Так максимальні струмові захисту (МСЗ) мають відносну селективність і є найпростішим способом захисту від ДКЗ – контролюють модулі струмів фаз, однак, існує необхідність її узгодження з захистами суміжних елементів енергосистеми, що обмежує її застосування.

До недоліків захисту можна віднести наявність «мертвої зони», яка охоплює відсіки вимірювальних трансформаторів і кабельні роз'єднання, і необхідність контролювати напрямок потужності на приєднаннях з потужними електродвигунами для забезпечення її селективної роботи в початковий момент КЗ.

Диференціальні струмові захисту мають абсолютну селективністю і принцип дії захисту базується на тому, що геометрична сума струмів з усіх сторін об'єкта, що захищається, за відсутності КЗ в ньому дорівнює нулю, а за наявності КЗ - дорівнює струму у місці ушкодження. Такі захисту не знайшли широкого поширення через необхідність встановлення додаткових датчиків

струму (трансформаторів струму) всередині електроустановки (  $TA_2$  ), як показано на рисунку 2. Це дозволяє виявити пошкодження в відсіках вимикача.

Застосування оптико-електричного принципу дозволяє створити захист електроустановки, яка в якості основної інформаційної ознаки використовує наявність струмів через основний (  $TA_1$  ) і додатковий (  $TA_2$  ) трансформатори струму, що дозволяє виявити ДКЗ відповідно у 2 та 3 відсіках. Пуск здійснюється від пристрою, що контролює параметр освітленості групи осередків в досліджуваному відсіку (рис.3.3)

Таблиця 3.2 - Інформаційні ознаки ДКЗ і необхідні умови спрацювання захистів від ДКЗ

№ п/п	Інформаційні ознаки	Умови спрацювання	Абсолютна селективність	Швидкість	Чутливість	Відсутність «мертвої» зони
1	2	3	4	5	6	7
1.	Модуль струму	$I_{\Phi} > I_{уст}$	-	+/-	+/-	+
2.	Модуль напруги	$U_{\Phi\Phi} < U_{уст}$	-	+/-	+	+
3.	Наявність струмів	$F = I_{\Pi} \cdot \prod_{i=1}^n \bar{I}_i$	+	+/-	+/-	-
4.	Сума струмів приєднань	$\sum_{i=1}^n I_i > I_{уст}$	+	+	+	-
5.	Аргументи струмів	$\varphi_{1уст} < \arg(\dot{I}_1 \wedge \dot{I}_n) < \varphi_{2уст}$	+	+	+	-
6.	Симетричні складові струмів	$I_{j\Phi} > I_{уст}$	-	+	+/-	+
7.	Симетричні складові напруги	$U_{j\Phi} > U_{уст}$	-	+	+/-	+
8.	Модулі гармонічних складових напруги	$ \dot{U}_{k\Phi\Phi}  > U_{куст}$	-	+	+	+
9.	Потужність	$S_{д} > S_{уст}, U_{\Phi\Phi} < U_{уст}$	-	+	+	+
10.	Аварійні складові струмів, напруги	$I_{ас} > I_{уст}, U_{ас} > U_{уст}$	-	+	+	+

## Продовження таблиці 3.2.

1	2	3	4	5	6	7
11.	Ортогональні складові струмів і напруги	$I_a > I_{уст}, I_p < I_{уст}$	-	+	-	+
12.	Швидкість зміни напруги / 11	$kdu/dt > U_{уст}$	-	+	+	+
13.	Опір	$ z_{кз}  < z_{уст}$	-	+	+	+
14.	Теплове (світлове) випромінюв.	$W_m > W_{уст}, E_\theta > E_{уст}$	+	+	+	+
15.	Оптична проникність середовища	$E_{окр} > E_{уст}$	+	+/-	+/-	+/-
16.	Тиск газового середовища	$P_e > P_{уст}$	+	+	+/-	+/-
17.	Фазове співвідношення сигналів світлового потоку і струму	$\varphi_{уст1} < (\dot{U}_2(E) \wedge \dot{I}_2) < \varphi_{уст2}$	+	+	+	+
18.	Електропровідність навколишнього середовища	$Y_{ij} < Y_{уст}$	+	+	+/-	+/-
19.	Електромагнітне випромінюван.	$E_s > E_{уст}, H_m > H_{уст}$	+	+	+	+/-
20.	Температура навколишнього середовища	$T_{окр} > T_{уст}$	+/-	-/+	-/+	+/-
21.	Спектральний склад випромінювання	$E_\lambda > E_{\lambdaуст}$	+	+	+	-

Аналіз технічних рішень захисту від пошкоджень, супроводжуються електричної дугою, на зарубіжному ринку електротехнічного обладнання показав, що ведучі розробники використовують появу електромагнітного випромінювання, в тому числі, в видимому спектрі частот, в якості основної інформаційної ознаки такого ушкодження. При цьому знайшли застосування два типи оптичних датчиків: зосереджені та розподілені. Як зосереджені оптичні датчики (ЗОД) застосовуються напівпровідникові фотоприлади (фотодіоди, фототранзистори, фототиристри) або волоконно-оптична лінія з поперечної сприймальною частиною (з лінзою або без її). Побудова системи захисту при використанні ЗОД передбачає аналіз інформації про пошкодження в певній точці обсягу захищеного об'єкту. При цьому захист має обмежений кут огляду, і необхідно визначати зони з максимальною чутливістю для встановлення датчиків в об'єкті який захищається.

Застосування радіальних ліній зв'язку можливе як з фото-, так і з волоконно-оптичними датчиками з поперечної сприймальною частиною. Для

фотодатчиків можливе використання загальної шини, що дозволяє оптимізувати підключення до налаштування захисту. Для захисту вказаного типу властиво одно- та багатоканальний принцип побудови пристроїв.

Застосування розподілених оптичних датчиків дозволяє розширити зону, яка захищається пристроєм. У якості розподіленого датчика можливо використання поздовжньої поверхні волоконно-оптичної лінії зв'язку як сприймаючого елемента. Такий датчик виконується у вигляді «петлі», що охоплює весь об'єм який захищається, наприклад, секція КРУ. До недоліків такого вхідного каскада можна, віднести складність монтажу всередині ЗРУ, яка обумовлена необхідністю прокладки оптоволоконного кабелю вздовж всього захищуваного об'єкту. Аналогічним властивістю має система зосереджених оптичних датчиків з оптичними датчиками, включеними в паралель.

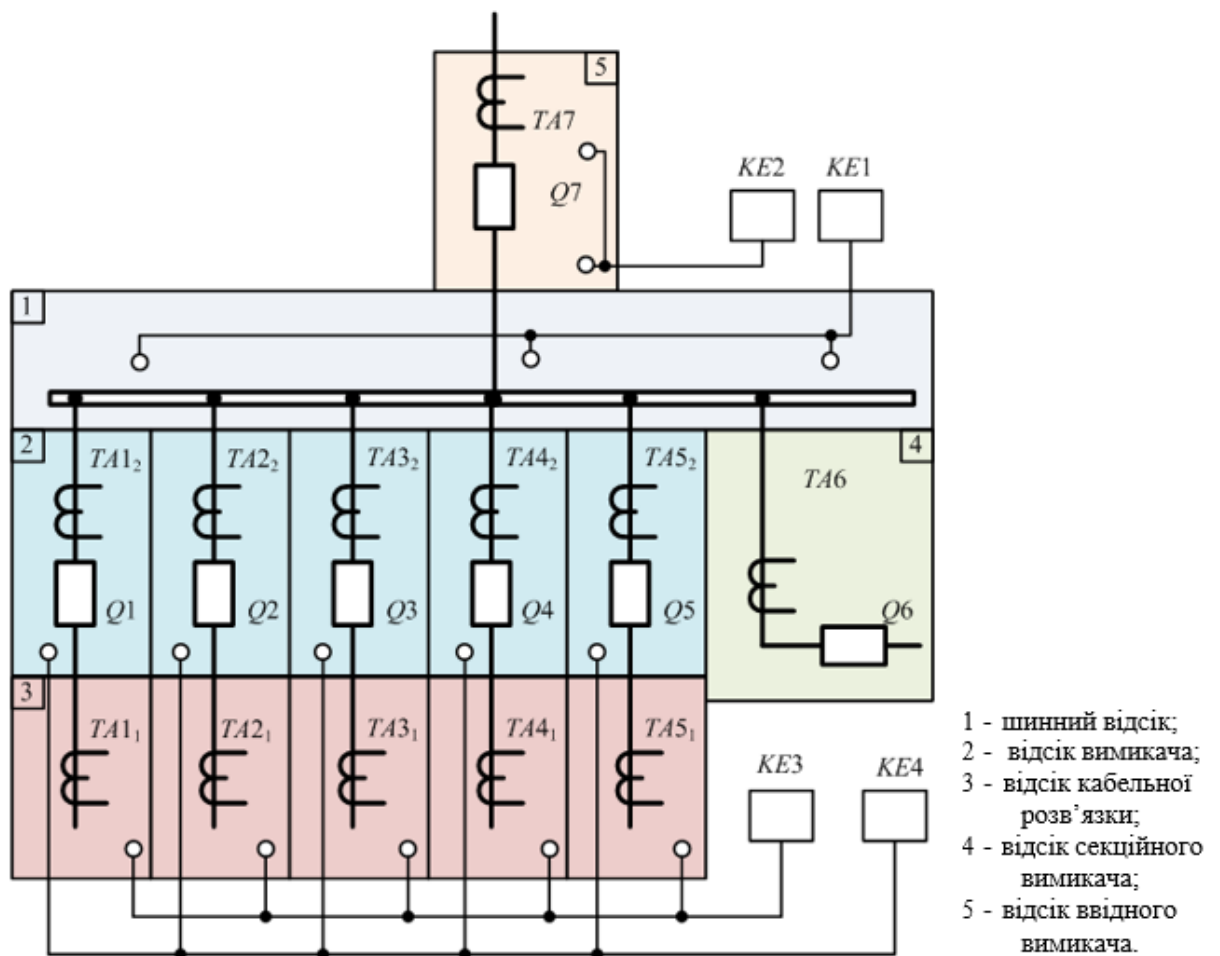


Рисунок 3.3 - Схема встановлення оптичних датчиків в відсіках

осередків закритого розподільчого пристрої

### **3.2 Розробка алгоритмів аналізу роботи функцій релейного захисту і автоматики з використанням даних про місце ушкодження**

Створення централізованою системи релейний захисту і автоматики (РЗА) є одним з можливих перспективних напрямів розвитку технологій релейний захисту [2,3]. Розвиток нових технологій вимагає підвищеної уваги до питань збереження та покращення рівня роботи релейного захисту (її селективності, швидкодії, чутливості, надійності), тому розробка системи діагностики централізованою системи РЗА є актуальним завданням. Однією з її підзадач є експрес-аналіз аварійних подій електричної системи на основі даних, отриманих в результаті роботи алгоритму визначення місця ушкодження (ВМУ).

Експрес-аналіз необхідний для визначення причин виникнення аварійних режимів енергооб'єкта, а також для оцінки правильності роботи пристроїв РЗА та протиаварійної автоматики (ПА) [3]. Отримані в ході такого аналізу дані дозволять розробити комплекс заходів для запобігання розвитку аварійного режиму [5].

Процедура експрес-аналізу розвитку аварій на рівнях енергооб'єкта запускається після спрацьовування функції фіксації автоматичного вимкнення силового вимикача мікропроцесорними пристроями РЗА. Джерелом вхідної інформації є сигнали, одержувані з програмного комплексу реєстрації аварійних подій (ПК РАП), а також параметри функцій РЗА, описані стандартизованою моделлю даних [10].

Взаємна інтеграція енергетичних систем може бути реалізована на основі стандартів МЕК 61970 та МЕК 61968, зокрема з використанням загальних інформаційних моделей CIM (Common Information Model), які широко застосовуються в світовій практиці та підтримуються різними існуючими програмними системами [6, 8]. Інформаційна CIM- модель енергосистеми містить схему з'єднань первинного обладнання з описом їхніх параметрів [11]. Іншим варіантом опису моделі даних є використання стандарту МЕК 61850-9-



2LE, який є більш переважним, так як обмін інформацією між вторинними пристроями та реєстратором аварійних подій здійснюється за протоколом MEK 61850-9-2LE (по шині процесу) [7].

Схема діагностики пристроїв РЗА на основі розрахунків алгоритму ЗМП представлена на рис. 3.4.

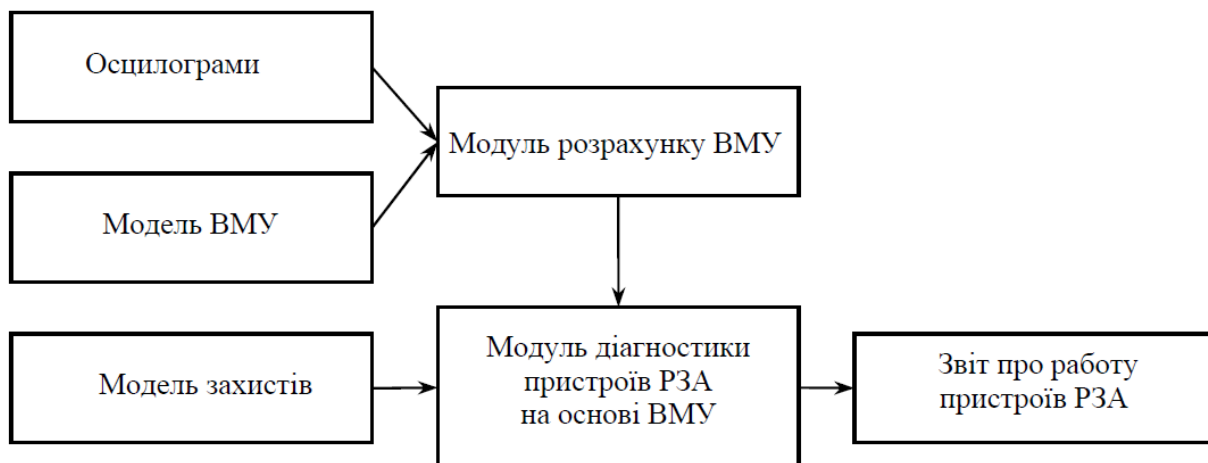


Рисунок 3.4 - Схема діагностики пристроїв РЗА на основі розрахунків алгоритму ВМУ

Осцилограми, записані цифровим реєстратором аварійних подій (ЦРАП) в централізованій системі РЗА, і модель лінії (модель ВМУ) задаються вихідними даними для модуля розрахунку ВМУ. Алгоритм діагностики пристроїв РЗА на основі даних, отриманих у результаті роботи алгоритму ВМУ, здійснюється після того, як ЦРАП сформує відповідну осцилограму. Осцилограми повинні бути записані в загальноприйнятому форматі реєстрації осцилограм перехідних процесів (аварій) в енергосистемах COMTRADE. Модель ВМУ описує лінію електропередачі (довжину, активні і реактивні опору ділянок ліній, параметри паралельних чи- ній і відгалужень і і т.д.). Модуль розрахунку ВМУ видає наступні дані: відстань до місця пошкодження, дату, час, вигляд короткого замикання (КЗ) (однофазне, міжфазне, трифазне, двофазне на землю), особливу фазу, діючі значення струмів і напруг при КЗ і в передаварійному режимі, кути між струмами і напругами всіх фаз, значення нульової, прямої і зворотної послідовностей струмів і напруг при КЗ.

По параметрами КЗ на лінії електропередачі та моделі захисту (параметрам функцій захисту) проводиться аналіз роботи основних та резервних захистів, які контролюють цю лінію. Результатом аналізу є протокол експрес-аналізу аварійного режиму [9].

Під роботою захисту мається на увазі наявність пуску та спрацьовування захисту. Пуском вважається процес визначення порушення нормального режиму устаткування, що захищається [12]. Пуск захисту має відбутися, якщо виконані всі умови її пускових органів. Між блоками, що відповідають за пуск та спрацьовування захисту, є логічна частина, яка представляє собою схему, яка запускається пусковими органами РЗА. Робота схеми полягає у відключенні вимикачів миттєво або з витримкою по часу, а також у запуску різних пристроїв та виконанні інших передбачених дій [4].

З урахуванням даних, отриманих в результаті роботи алгоритму ВМУ, будемо розглядати і аналізувати наступні види захистів:

1. максимальний струмовий захист;
2. струмовий захист нульової послідовності;
3. захист мінімальної напруги;
4. дистанційний захист;
5. спрямований високочастотний захист.

*Максимальний струмовий захист (МСЗ).* Усі споживачі електроенергії підключаються до генераторного кінця лінії електропередач через силові вимикачі. Пристрої струмового захисту у постійному режимі сканують систему. Коли навантаження в енергомережі не перевищує номінальної величини, тобто. режим її роботи відповідає нормальному, вимикач не спрацьовує.

Вимикачі спрацьовують в наступних випадках:

- 1) виникає КЗ (внаслідок значення навантаження у системі стає більше номінального, створюються струми, які можуть призвести до загоряння обладнання);
- 2) виникає перевантаження в мережі через підключення додаткових

споживачів (або по іншим причин) (у результаті струм стає більше допустимого значення, відбувається нагрівання обладнання та струмопровідних частин системи);

3) відбувається зсув фази струму (в результаті струму, що проходить через силовий вимикач, змінює напрямок).

У першому випадку відключення необхідно проводити максимально швидко. У другому випадку доцільно відключати вимикач через деякий короткий проміжок часу, котрий дозволить створити затримку в живленні схеми, завдяки чому зайві навантаження можуть усунутись самі.

Для уникнення негативних наслідків, викликаних даними видами аварійних ситуацій, застосовуються такі види електрозахисту, як струмове відсікання та максимальний струмовий захист.

До складу систем для струмових захистів ЛЕП з двостороннім живленням входять (рис. 3.5):

- вимірювальні трансформатори струму (ТС), які призначені для перетворення первинного струму у вторинний із заданим класом метрологічної похибки;
- реле струму, які налаштовуються на уставку спрацьовування;
- схема комутації, призначена для передачі вторинного струму від трансформаторів струму до реле з мінімально допустимими втратами.

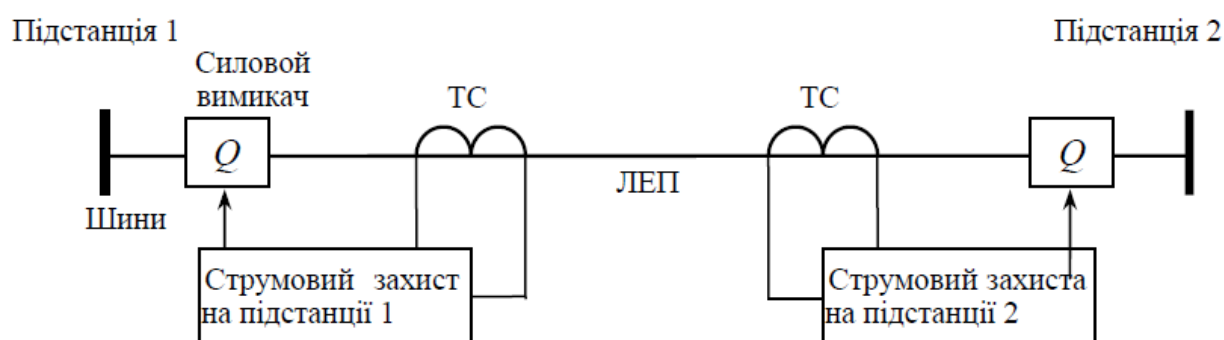


Рисунок 3.5- Схема комплексу струмових захистів ЛЕП з двостороннім живленням

Струмове відсікання (СВ) дозволяє максимально швидко здійснити ліквідацію КЗ, якщо вони виникли ближче до початку робочої зони (мінімум

порядка 20% протяжності). При цьому в окремих випадках цей вид релейний захисту може застосовуватися і для всієї ЛЕП (рис. 3).

У склад релейний захисту з СВ входять:

- вимірювальний орган із реле струму, виставленого на спрацювання мінімально можливого навантаження при виникненні металевого замикання в кінці зони яка захищається (або чутливості);
- проміжне реле, на обмотку якого подається напруга від спрацювавшого контакту вимірювального органу. Вихідний контакт проміжного органу впливає безпосередньо на соленоїд відключення силового вимикача, який вимикає його.

Системи захисту з МСЗ, крім аналогічних компонентів, які використовуються при струмовому відсіканні, для забезпечення щаблів селективності обов'язково доповнюються реле часу. Дане реле створює затримку на спрацювання вимикача [13].

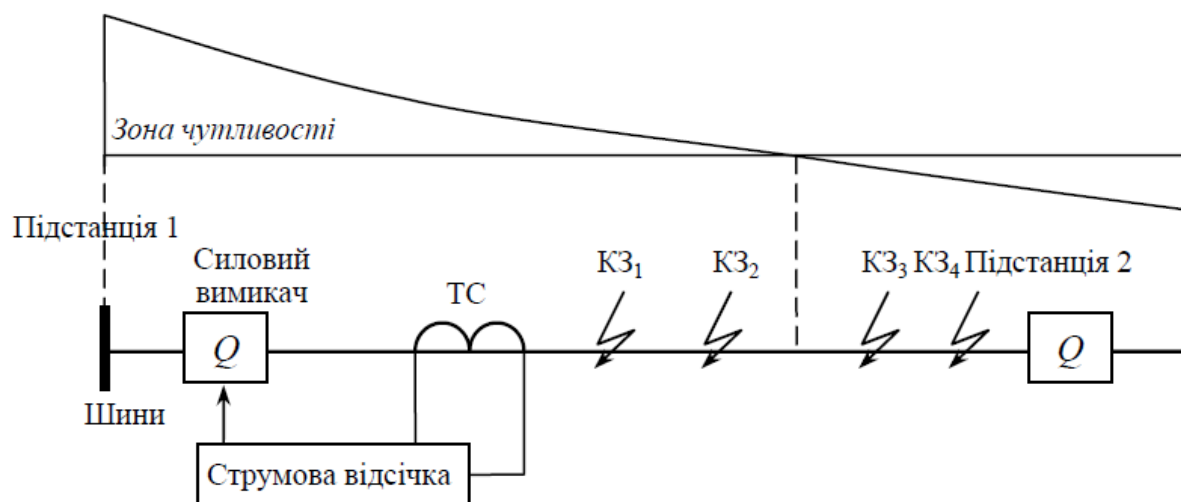


Рисунок 3.5- Зона дії СВ

Робота алгоритму розрахунку пуску МСЗ починається із ВМУ (рис. 4). Якщо відстань до місця виникнення КЗ (Length) знаходиться в межах довжини лінії і якщо, по крайній мірі, хоча б один з фазних аварійних струмів ( $I_a$  авар.,  $I_b$  авар.,  $I_c$  авар.) перевищує параметр струму спрацювання МСЗ ( $I_{Setting}$ ), то повинен відбутися її запуск.

Аналіз правильності спрацювання МСЗ по ВМУ здійснюється за

алгоритму, представленому на рис. 3.7.

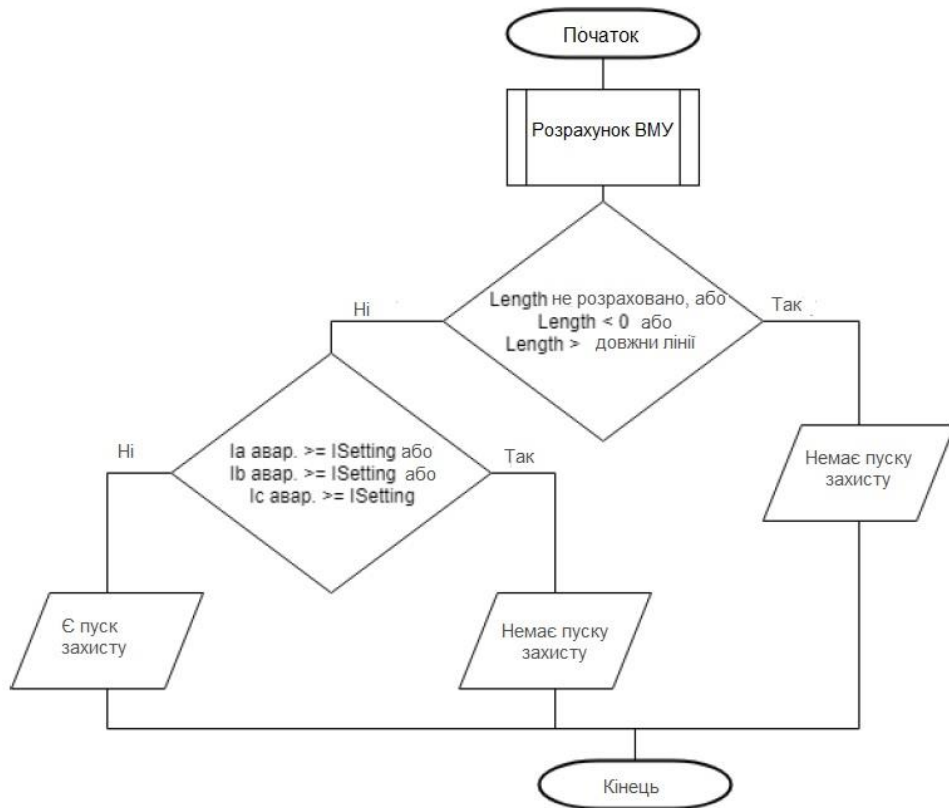


Рисунок 3.6 - Алгоритм розрахунку пуску МСЗ по ВМУ

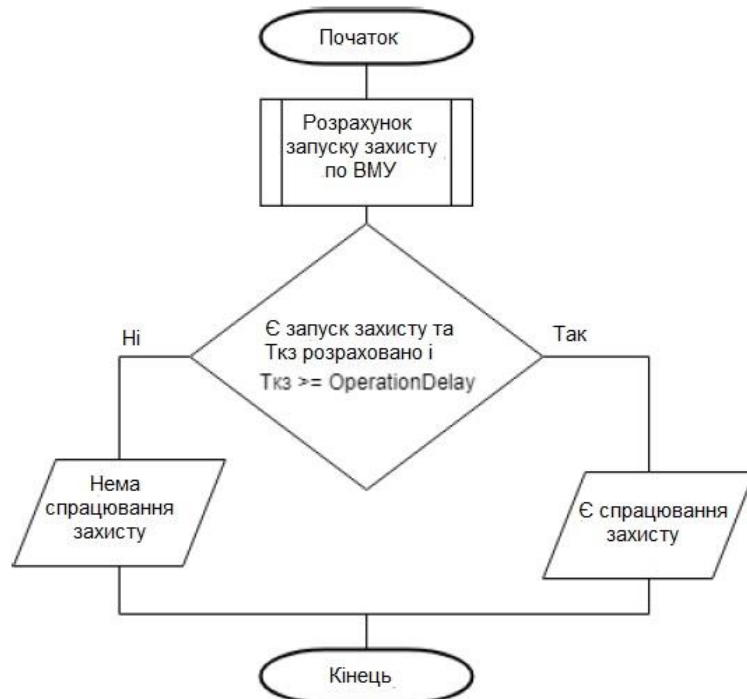


Рисунок 3.7- Алгоритм розрахунку спрацювання захистів

Захист повинен спрацювати, якщо відбувся його пуск і тривалість КЗ (Ткз) більше або дорівнює значенням затримки після пуску перед спрацюванням (OperationDelay).

Струмний захист нульової послідовності (ТЗНП). За наявності замикання на землю порушується симетрія в мережі, що може призвести до ушкодження обладнання. Пристрої ТЗНП використовуються для запобігання можливих наслідків від таких ушкоджень. На результуючий струм реагує релейний захист таких пристроїв (рис.3.8).

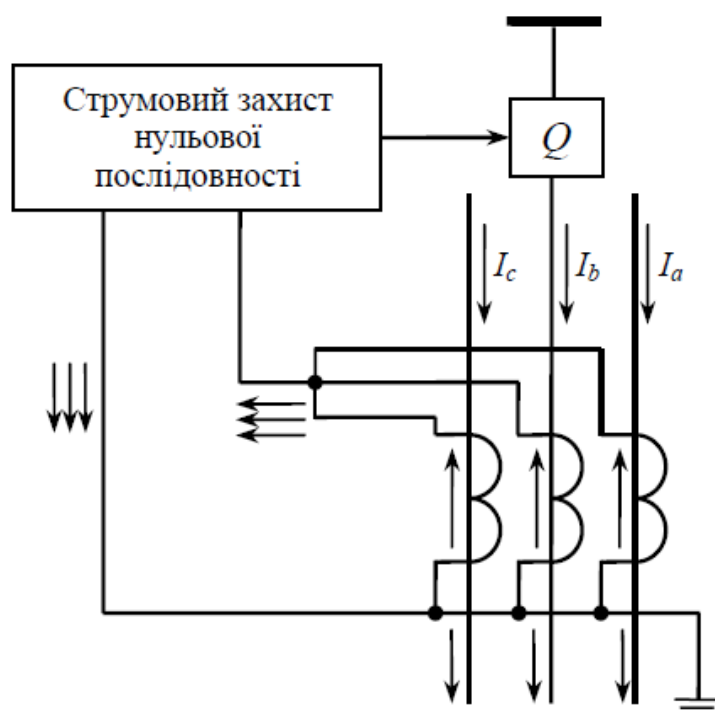


Рисунок 3.8 - Принцип роботи ТЗНП

У системах з ізольованою нейтраллю для виділення цих струмів використовується спеціальний трансформатор, встановлений на кабель.

На ЛЕП напругою 110 кВ із заземленою нейтраллю це виконати неможливо, оскільки струми КЗ землі досягають великих значень. В цьому випадку на звичайних трансформаторах струму, які використовуються для релейного захисту, виділяються окремі обмотки на кожній фазі, які з'єднуються між собою послідовно, при цьому початок наступної фази з'єднується з кінцем попередньої. Крім цього в цей ланцюг включаються також

і струмове реле обмотки.

Вся ділянка, що підлягає захисту, поділяється на зони. Система захисту стає багатоступінчастою. Перший ступінь спрацьовує при максимальних значеннях струму, при цьому витримка часу мінімальна або дорівнює нулю, наступна - при меншому струмі, але з більшою витримкою по часу.

Алгоритм розрахунку пуску ТЗНП починається із ВМУ (рис. 3.9). Якщо відстань до місця виникнення КЗ ( $Length$ ) знаходиться в межах довжини лінії та якщо струм нульової послідовності ( $3I0_{сим.}$ ) перевищує параметр струму спрацьовування ТЗНП ( $3I0_{Setting}$ ), то можна стверджувати, що має відбутися пуск ТЗНП [12].

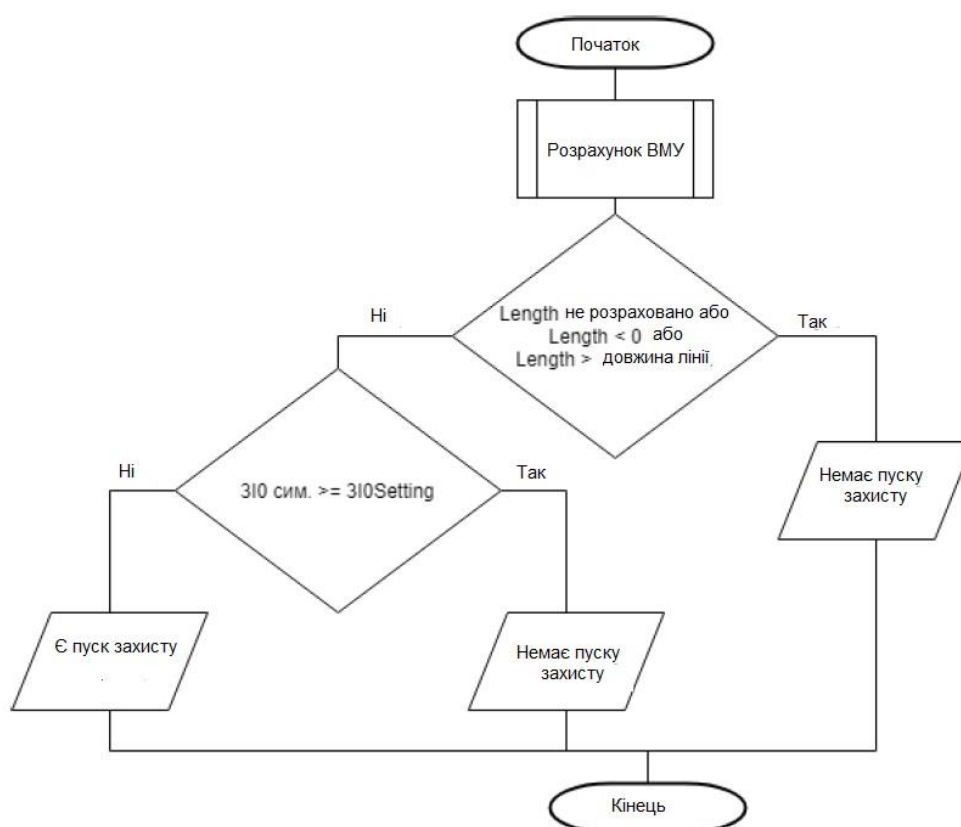


Рисунок 3.9- Алгоритм розрахунку пуску ТЗНП по ВМУ

Захист мінімальної напруги (ЗМН). При виникненні аварійних ситуацій, пов'язаних з КЗ, коли відбуваються значні втрати енергії, прикладена потужність витрачається на розвиток ушкоджень. При цьому виникають великі струми, а напруга різко падає.

Аналогічна картина може також спостерігатися при перевантаженні

системи, коли потужностей джерел напруги не вистачає.

Пристрої ЗМН контролюють величину напруги в мережі і відключають силовий вимикач при зниженні напруги до мінімально можливої величини (уставки) або подають відповідний сигнал оперативному персоналу (рис. 3.10).

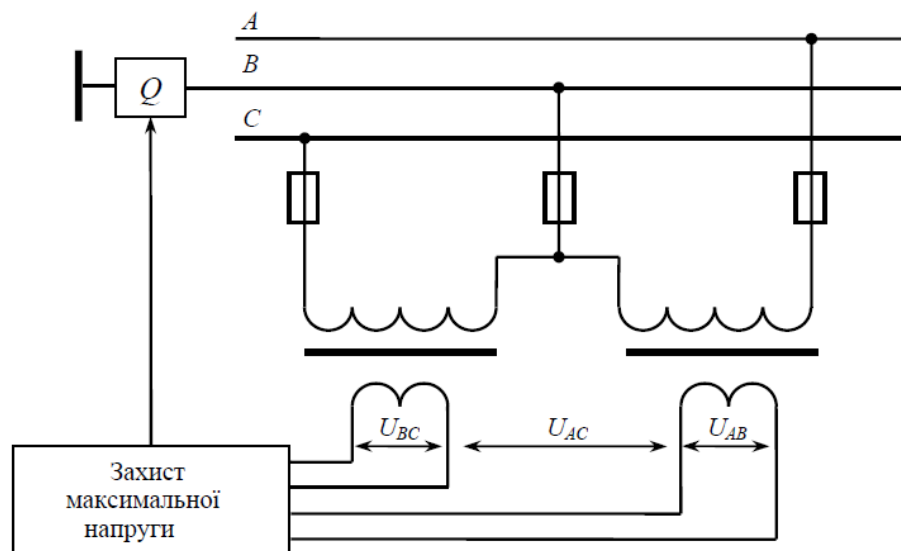


Рисунок 3.10 - Принцип роботи ЗМН

Їх вимірювальний орган схожий по структурі на той, який використовується в струмовому захисті. Але він має власні конструктивні особливості.

У склад пристроїв ЗМН входять:

- вимірювальний трансформатор напруги (ТН), який призначений для перетворення первинної напруги мережі в пропорційне значення вторинної з високою точністю, обмеженою допустимими метрологічними характеристиками;
- реле мінімальної напруги (РН), яке спрацьовує, якщо контрольований ним рівень напруги знизився і досяг величини напруги уставки;
- електрична схема ланцюгів напруги, які призначені для передачі вторинного вектора від трансформатора напруги до реле напруги з мінімальними втратами та похибками.

При цьому ЗМН можуть працювати як автономно, так і в комплексі з



іншими пристроями, наприклад, струмовими захистами або контролем потужності. Алгоритм розрахунку пуску ЗМН починається з ЗМЗ (рис. 3.11). У разі якщо відстані до місця виникнення КЗ (Length) знаходиться в межах довжини лінії і якщо, принаймні, хоча б одна з фазних аварійних напруг ( $U_{a \text{ авар.}}$ ,  $U_{b \text{ авар.}}$ ,  $U_{c \text{ авар.}}$ ) знижується нижче параметра напруги спрацьовування МСЗ (USetting), то повинен відбутися пуск ЗМН.

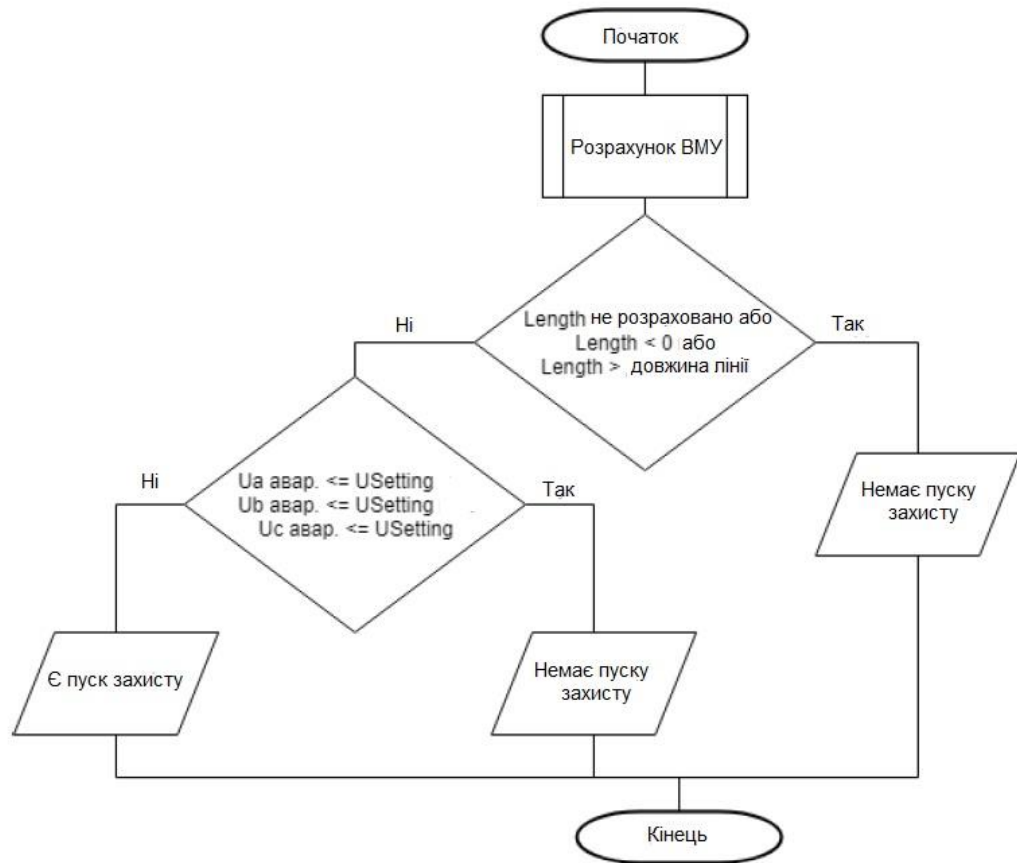


Рисунок 3.11 - Алгоритм розрахунку пуску ЗМН по ЗМП

Аналіз правильності спрацьовування ЗМН по ЗМП здійснюється так ж, як і при використанні інших видів захисту (Див. рис. 3.7).

Дистанційний захист (ДЗ). Дистанційний захист - захист, який реагує на відстань до точки КЗ. Місце замикання визначається за допомогою реле опору. Опір розраховується згідно із законом Ома на підставі значень струму і напруги, одержуваних від трансформаторів струму та напруги, відповідно.

Реле опору спрацьовує при умові

$$Z_p = \frac{U_p}{I_p} < Z_{уст},$$

де  $Z_p$  - опір лінії електропередачі при КЗ;  $U_p$  - напруга електричної мережі при КЗ;  $I_p$  - сила струму лінії електропередачі при КЗ;  $Z_{вуст}$  – уставка опору спрацьовування реле.

Вимірювана величина є фіктивною, тому що в деяких режимах роботи (наприклад, при коливаннях) її фізичний зміст як опору губиться.

Вся захищається область ділиться на зони. Пристрої ДЗ, як правило, у своєму складі мають не менше трьох уставок спрацьовування і реле опору. Для кожної зони час спрацьовування свій, а уставка реле опору дорівнює опору до точки виникнення КЗ в кінці відповідної зони.

Уставка опору спрацьовування реле в першій зоні ДЗ розраховується так, щоб забезпечити захист тільки своєї лінії, що відходить (не до кінця, а з урахуванням похибки вимірювання опору – 0,7–0,85 її довжини). При спрацьовуванні реле опору першої зони ДЗ лінія відключається з мінімально можливою витримкою часу, так як місце виникнення КЗ точно знаходиться на ній.

Друга зона ДЗ резервує відмову захисту наступної підстанції. Для цього пристрої захисту реагують на КЗ наприкінці другої лінії. При цьому витримки часу другої зони ДЗ першої підстанції більше, ніж першої зони ДЗ другої підстанції. Завдяки цьому забезпечується необхідна селективність, в результаті чого вимикач другої лінії від другої підстанції відключиться раніше, ніж відпрацює реле часу захисту на першій підстанції.

Третя зона ДЗ використовується для резервування захисту наступної лінії, якщо вона є в наявності. Додаткової кількості зон не передбачено.

При аналізі роботи ДЗ стоїть врахувати, що ВМУ дає результати тільки на контрольованій лінії. У разі, коли в результаті ВМУ відстань до місця виникнення КЗ перевищуватиме довжину самої лінії, не можна з точністю стверджувати, що КЗ сталося на відстані, яку обчислює алгоритм. Це з тим, що ВМУ ведеться за параметрами заданої лінії, за межами лінії – за апроксимованими характеристиками лінії, котрі можуть і не відповідати фактичних даних [11].

У випадку, коли відстань до КЗ потрапляє на лінію, обов'язково має відбутися пуск захисту ДЗ другої та третьої зон, оскільки вони контролюють усі зони. Пуск захисту першої зони ДЗ відбувається, коли відстань до місця виникнення КЗ не перевищує довжину контрольованої зони, яка дорівнює  $0,7-0,85$  довжини лінії (Length контр.) (Рис. 3.12).

Експрес-аналіз допускає аналіз роботи ДЗ по всій довжині контрольованих зон. При аналізі функцій РЗА за еталонними алгоритмами характеристика спрацьовування ДЗ будується для кожного ступеня (кожний ступінь контролює свою зону).

Аналіз спрацьовування ДЗ по ЗМП здійснюється так само, як і при використування іншими видами захисту (див. рис. 3.7).

Спрямований високочастотний (ВЧ) захист (НВЧЗ). Захист ділянки лінії електропередачі складається з двох напівкомплектів, розташованих по обом кінцям лінії і включають мікропроцесорні термінали релейного захисту, приймач і відповідне високочастотне обладнання (Рис. 3.13).

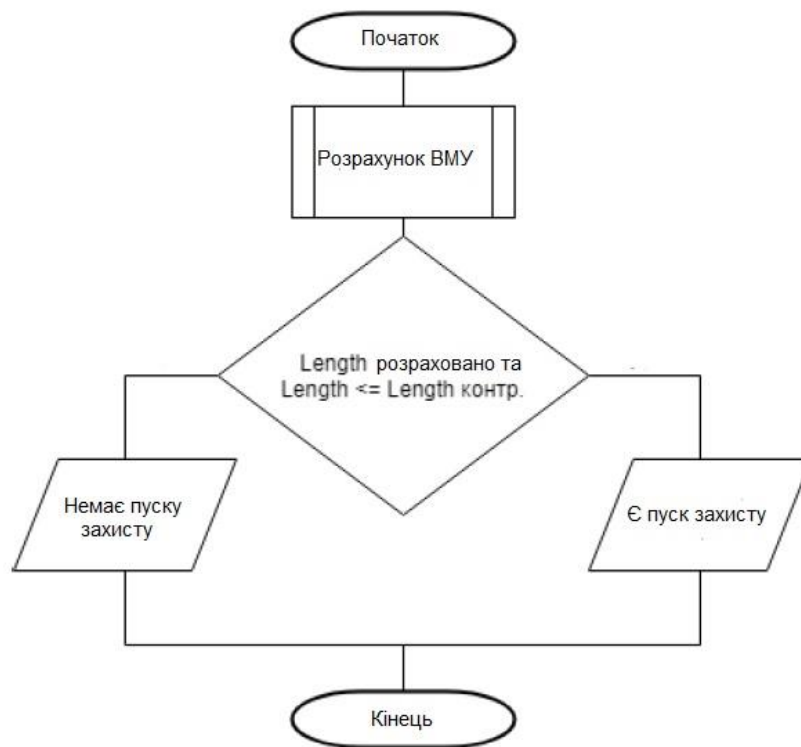


Рисунок 3.12 - Алгоритм розрахунку пуску ДЗ по ЗМП

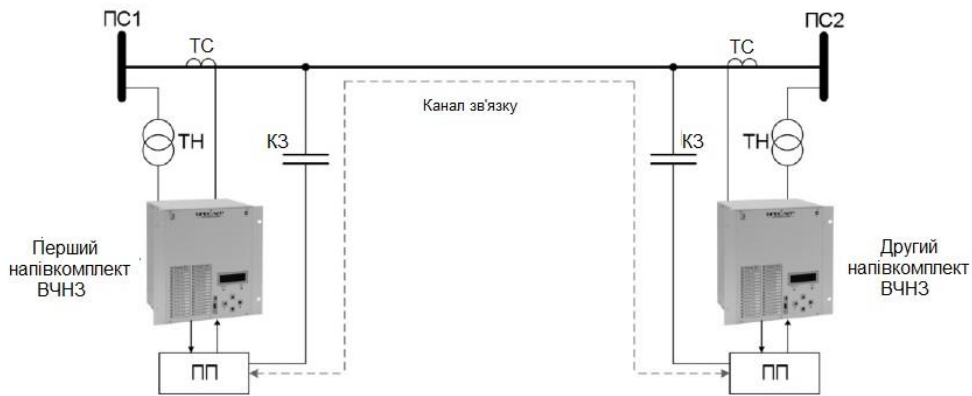


Рисунок 3.13 - Принцип роботи НВЧЗ

Принцип дії захисту ґрунтується на непряму порівнянні напрямку потужності на кінцях лінії, що захищається за допомогою сигналів високої частоти, що передаються каналами зв'язку. При несиметричних КЗ ушкодженнях потужність зворотної послідовності в лінії, що захищається спрямована до місця установки напівкомплектів захисту, а при симетричних ушкодженнях потужність прямої послідовності спрямована, навпаки, від шин в лінію.

У початковий момент виникнення ушкодження спрацьовують блоки-вимірювальні органи (ВО), забезпечуючи прискорений пуск прийомо-передавача, який посилає блокуючий сигнал на протилежний кінець лінії. Після спрацювання ВО блокуючий сигнал високої частоти знімається тим напівкомплектом захисту, для якого зворотна потужність послідовності спрямована до шин у разі несиметричних КЗ, або потужність прямої послідовності спрямована в лінію при симетричних КЗ. У разі пошкодження на лінії, що захищається, блокуючі сигнали високої частоти відсутні, і кожен з напівкомплектів може діяти на вимкнення вимикача. При КЗ за межами лінії до підстанції, де стоїть пристрій ВМУ, зупиняючи одного з напівкомплектів на відповідному кінці лінії прийомо-передавача не відбувається, в наслідок чого блокуються обидва напівкомплекти захисту.

Як канал зв'язку виступає сама лінія електропередачі. Блоки- сигнали передаються за допомогою високочастотних приймачів. Термінали високочастотної захисту можуть працювати спільно з приймачами різних

виробників.

Розрахунок пуску НВЧЗ починається з розрахунку ЗМЗ (рис. 12). Єдиним умовою пуску НВЧЗ під час аналізу по ЗМП є перебування місця виникнення КЗ (Length) в межах довжини лінії (рис. 3.14).

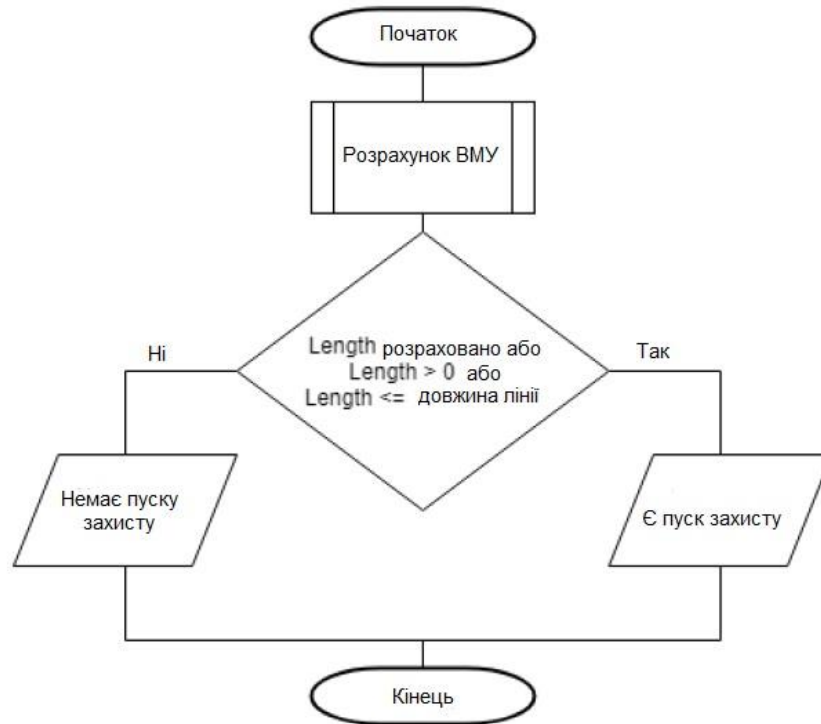


Рисунок 3.14 -

Аналіз спрацьовування НВЧЗ по ЗМЗ здійснюється так само, як і при використанні інших видів захисту (Див. рис.3 7).

### Висновки по третьому розділу

Побудова релейного захисту електроустановок 6-10 кВ, що має функції швидкодіючого захисту від ДКЗ з можливістю попередження ушкоджень що розвиваються за рахунок виявлення ОЗЗ всередині енергооб'єкта, дозволяє підвищити надійність роботи електроенергетичних об'єктів, зменшити негативні наслідки ДКЗ.

Аналіз всіх вищеназваних функцій захистів за ВМУ не є єдиним варіантом контролю їх правильною роботи. Функції захисту, призначені захищати лінії електропередачі і підключене до них обладнання, також можуть бути реалізовані в еталонній моделі захисту. У цифровій моделі можуть бути реалізовані алгоритми захистів, які мають місце в пристроях РЗА.

## ВИСНОВКИ

У роботі наводяться основні вимоги до захисту, об'єднуючим в собі функції захистів від однофазних замикань на землю і дугових захистів. Виконаний аналіз варіантів побудови таких захистів, наведено рекомендації по установці захистів з різним числом каналів та датчиками різних типів.

Побудова релейного захисту електроустановок 6-10 кВ, що має функції швидкодіючого захисту від ДКЗ з можливістю попередження виникаючих ушкоджень за рахунок виявлення ОЗЗ всередині енергооб'єкта, дозволяє підвищити надійність роботи електроенергетичних об'єктів, зменшити негативні наслідки ДКЗ. Побудова такої захисту можливо здійснити шляхом об'єднання в систему пристроїв захисту від замикань на землю типу РНМ-03КІ, РЕНОМ-04(Л, Т) та пристроїв захисту.

Розроблено алгоритми аналізу роботи функцій РЗА (максимальний струмовий захист, струмовий захист нульової послідовності, захист мінімальної напруги, спрямований високочастотний захист, дистанційний захист) на основі ВМУ.

Створено програмний комплекс аналізу та діагностики комплектів та функцій захистів.

Проведено дослідження, в ході яких встановлено, що розроблено алгоритми аналізу роботи функцій РЗА на основі ВМУ можуть бути використані в реальних електроенергетичних системах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с
2. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – Ч. 2. – 276 с., рис. 48, табл. 19.
3. Лежнюк, П. Д. Методи і засоби захисту від обриву проводу та пошук місця пошкодження в розподільній мережі зі складною топологією напругою 6–35 кВ : монографія / П. Д. Лежнюк, М. В. Кутіна. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 152 с.
4. Шкрабець Ф.П. Ш 64 Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
5. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.
6. Бурбело М.И., Мельничук С.М. Использование реле проводимости для выявления неполнофазных режимов в сетях 110–220 кВ // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2(119). С. 40–44.
7. Мілих В.І. М75 Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
8. Добровольська Л.Н., Волинець В.І., Собчук Д.С., Черкашина В.В. Електричні мережі з відновлювальними джерелами енергії: навчальний посібник / Любов Наумівна Добровольська, Владислав Ігорович Волинець, Дмитро Сергійович Собчук, Вероніка Вікторівна Черкашина. // Під редакцією Добровольської Л.Н.– Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2016. – 352 с.
9. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с., рис. 41, табл. 20. ISBN

10. Основи релейного захисту та автоматики : курсове проектування / М. Й. Федорів, П. М. Николин, У. М. Николин, А. І. Поточний. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2010. - 84 с.
11. Яндульський О.С., Дмитренко О.О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с. – Бібліогр. : с. 92 – 102.
12. Баран П. М., Кідиба В. П., Пришляк Я. Д. Цифрові пристрої релейного захисту трансформаторів (автотрансформаторів) Навчальний посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 208 с
13. Електрична частина станцій і підстанцій: Навч. посібник / А.О.Омельчук. - К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. - 479 с.