

## Аналіз особливостей виконання диференційних захистів ліній електропередач надвисокої напруги

А. К. Топор, М. Ю. Шабовта

Національний університет «Одеська політехніка»

**Анотація.** У цій статті проаналізовано світовий досвід вдосконалення диференційних захистів та представлено порівняльний аналіз високочастотних захистів для ліній надвисокої напруги, а саме диференційно-фазний струмовий захист та направлений високочастотний захист. Виявлено складнощі у впровадженні алгоритму роботи диференційно-фазного захисту у цифрових терміналах саме для довгих ліній надвисокої напруги. В результаті аналізу науко-технічної літератури було підтверджено актуальність зазначеної проблеми. Для її вирішення запропоновано поглиблений аналіз роботи релейного захисту оснований на цифровій елементній базі за допомогою математичного моделювання роботи ліній надвисокої напруги.

**Ключові слова:** релейний захист, диференційний захист, диференційно-фазний захист, високочастотний захист, лінія електропередачі надвисокої напруги, перехідні процеси, короткі замикання, моделювання, енергосистема.

### Вступ

У зв'язку із бурхливим розвитком нових технологій та застосуванні їх в енергетичній сфері на даний час є необхідність пошуку нових рішень для впровадження їх в засоби релейного захисту. Із розвитком цифрових технологій та застосування їх для релейного захисту ліній електропередачі виникає необхідність постійного аналізу їхньої роботи та вдосконалення принципів виконання захистів. В залежності від параметрів ліній електропередачі та каналів зв'язку між її кінцями, а також вимог до стійкості енергосистеми, застосовуються відповідні захисти.

На даний час вже виконана реалізація типових диференційних захистів на базі цифрових пристроїв. Але із подальшим розвитком енергомереж, пов'язаним із збільшенням застосування відновлювальних джерел енергії, використання розподіленої генерації, а також передачі великої потужності на великі відстані, типові захисти не завжди забезпечують умови селективності та швидкодії.

В сучасній об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України для передачі великої потужності застосовуються мережі надвисокої напруги (НВН) 330-750 кВ. Це дозволяє зменшити струми навантаження, а також втрати потужності при передачі електроенергії.

© Топор А. К., Шабовта М. Ю., 2025

Дуже важливим фактором роботи об'єднаної енергосистеми є її стійкість. На стійкість енергосистеми впливає час вимикання пошкоджень її елементів та селективність такого вимкнення. Тому для мереж НВН необхідно застосовувати захисти із найменш можливим часом спрацьовування та абсолютною селективністю. До таких захистів відносяться диференційні захисти (ДЗ).

### 1. Постановка проблеми

Необхідність заміни застарілих електромеханічних пристроїв захисту на сучасні цифрові пристрої вимагає детального аналізу алгоритму його роботи. Наразі є складнощі у впровадженні алгоритму роботи диференційно-фазного захисту (ДФЗ) у цифрових терміналах для довгих ліній НВН. Лінії даної напруги мають велику ємнісну складову, що призводить до появи складних перехідних процесів. Ці процеси впливають як на величину вимірюваних параметрів, так і на якість сигналу, який передається високочастотним каналом (ВЧ). Це впливає на селективність роботи та збільшення часу спрацьовування захистів, що зменшує стійкість енергосистеми.

Можна виділити пов'язані із цим основні проблеми:

– можливе зайве спрацьовування ДФЗ при зовнішніх несиметричних коротких замиканнях (КЗ) за рахунок появи ємнісного струму лінії на кінці, що ближче до місця пошкодження;

- значні перешкоди при передачі сигналів ВЧ каналом на довгих лініях електропередачі НВН сприяють зміні значення сигналу і хибним спрацьовуванням захисту.

Для забезпечення правильної роботи захистів протягом десятиліть проводились вдосконалення електромеханічних та напівпровідникових пристроїв захисту. Досвід використання та експлуатації таких типів захистів на базі цифрових пристроїв показує потребу в їх постійному доопрацюванні. Тому, це питання потребує подальшого поглибленого вивчення та детального аналізу.

## 2. Огляд літератури

### *Іноземні джерела інформації*

Для вдосконалення роботи диференційних захистів, в даній статті проаналізовано досвід закордонних та вітчизняних фахівців.

У роботі [1] розглядається направлений захист із високочастотним блокуванням (НВЧЗ) для ліній електропередачі, які з'єднують великі вітрові електростанції з енергосистемою.

Автори наголошують про вплив відновлювальних джерел енергії порівняно із традиційними системами генерації електроенергії на перехідний процес при КЗ. Ця ситуація погіршує надійність традиційних дистанційних і диференційних захистів ліній електропередачі. Тому для подолання цих проблем було запропоновано нову схему захисту з локально вимірювальних сигналів напруги та струму з використанням високочастотних складових, що генеруються внаслідок виникнення пошкодження. Запропонована схема захисту не вимагає алгоритму компенсації ємнісного струму лінії. Результати моделювання підкреслюють надійність та безпеку запропонованої схеми захисту за різних умов випробувань для ліній довжиною до 200 км.

У статті [2] наведений новий принцип захисту для ліній, які з'єднують великі вітрові електростанції. Коливання вихідної потужності вітрових електростанцій (ВЕ) та їхні характеристики перехідних процесів короткого замикання негативно впливають на системи диференційного захисту. Зі збільшенням довжини лінії електропередачі та у випадку слабкої вихідної потужності від ВЕ, диференційний струм між обома кінцями лінії збільшується в нормальних умовах, оскільки ємнісний струм сумірний зі струмом навантаження. У цій статті пропонується новий алгоритм диференційного захисту для таких ліній електропередачі. Запропонований алгоритм диференційного струмового захисту розроблено на основі знаків фазного струму на обох кінцях

лінії, замість безпосереднього використання величин струму.

Вивчення перехідних процесів при КЗ має вирішальне значення для підвищення ефективності захисту ліній вітрових електростанцій. Це наголошується в роботах [3], [4], [5]. В них розглядається метод аналізу частотної складової диференційного струму у вітрової електростанції та порівняння із складовою основної промислової частоти. Автори кількісно аналізують домінуючу частотну складову диференційного струму замикання у лінії на основі методу еквівалентної лінії із зосередженими параметрами та частотного імпедансу вітрової електростанції. Порівняно з диференційним захистом промислової частоти, ця схема підвищує швидкість роботи захисту та чутливість. Щоб уникнути негативного впливу від насичення трансформаторів струму, для дії захисту використовується проміжок часу менший 5 мс.

Запропонована схема ДЗ від перехідних процесів нова та потребує впровадження та подальшого аналізу в реальних умовах.

В роботах [6], [7] розглядається покращена схема захисту лінії електропередачі на основі біжучої хвилі. Традиційні методи захисту основані на біжучої хвилі мають обмеження щодо надійності та швидкості для ліній надвисокої напруги. Запропонована схема для підвищити надійність та ефективність механізму захисту використовує співвідношення між хвилями, що біжать від місця пошкодження, а саме відбитими хвилями та заломленими хвилями на кінці лінії. Надійність запропонованої схеми захисту перевірено та підтверджено за допомогою експериментів, проведених на цифрово-аналоговій тестовій платформі стимулятора реального часу. Порівняльний аналіз захистів ліній НВН мереж змінного та постійного струмів виконано у роботі [8]. Системи змінного струму високої напруги (ВНЗС) та постійного струму високої напруги (ВНПС) є важливими для ефективного переходу енергії та електрифікації, що створює значні труднощі для забезпечення надійності та безпеки електроенергетичних мереж. Різні сценарії пошкоджень були протестовані за допомогою файлів COMTRADE, що виявило важливі особливості при порівнянні підходів до захисту на основі імпедансу та біжучої хвилі, щоб виділити сильні та слабкі сторони обох підходів до захисту. У цій статті були розглянуті дві схеми захисту для біполярних систем високовольтного постійного струму з використанням теорії біжучої хвилі та модального перетворення. Схема захисту на основі біжучих хвиль менш вразлива до спрацьо-

вування нестабільних операцій за різних сценаріїв пошкодження.

У роботі [9] та [10] наведені нові принципи виконання диференційних захистів для ліній надвисокої напруги підключених до джерел відновлювальної енергії. Запропоновані схеми використовують модель Бержерона для усунення впливу розподіленого ємнісного струму та новий принцип адаптивного диференційного захисту на основі амплітудної та фазової компенсації. Результати моделювання за різних умов у середовищі Matlab/Simulink демонструють, що принцип захисту може добре адаптуватися до різних режимів роботи електростанції.

У статті [11] розглядаються постійні виклики до підвищення надійності роботи розподільчих систем та вимоги до схеми захисту для забезпечення надійної та стійкої роботи енергетичної систем. Огляд літератури, представлений у цій статті, показує, що виклики та можливості для захисту виникають у багатьох різних областях, включаючи нові стандарти поєднання розподілених енергетичних ресурсів (PER), зміни в роботі системи та здатність експлуатувати системи як реконфігуровані мережі з штатним режимом острівкування.

#### *Вітчизняні джерела інформації*

У зв'язку з тим що в Україні вже багато років експлуатуються високочастотні захисти для ліній 330-750 кВ, далі розглядаються наукові праці вітчизняних авторів пов'язані із особливостями саме високочастотних захистів.

Питання високочастотних диференційно-фазних та направлених захистів ліній електропередачі досить широко розглянуто в навчальних посібниках релейного захисту Федосєєва О. М. та Кідиби В. П. У цих роботах наводиться принцип роботи ДФЗ ВЧ та НВЧЗ, мета та сфера застосування цих захистів. Також глибоко розглядається принцип роботи захистів на електро-механічній базі, яка в даний час є застарілою. Основною особливістю є опис застосування цих захистів для ліній високої напруги 110-220 кВ, більш розповсюджених, ніж ліній надвисокої напруги 330-500-750 кВ, для яких виникають складнощі у використанні захистів.

В роботах [12] та [13] розглянуто практичне застосування теоретичних підходів виконання ДФЗ на базі електромеханічних елементів, показані типові схеми та розрахунки уставок захистів. Головним питанням залишається виконання даного захисту на сучасній цифровій базі для ліній НВН.

Рекомендації по вибору уставок та Вказівки до застосування мікропроцесорного пристрою L60 фірми General Electric наведені у роботах

[14] та [15]. Важливим питанням є експериментальне випробування зазначених рішень за допомогою моделювання для реальних мереж НВН.

У навчальному посібнику Бессонова Л.А. «Теоретичні основи електротехніки» (Bessonov. L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki : Izd. 9-e, pererab. i dop. M. : Vysshaya shkola, 1996. 638 s.) розглядаються характеристики ліній з розподіленими параметрами, знаходження параметрів цих ліній через розв'язки диференційних рівнянь. Лінії з розподіленими параметрами можна прирівняти до ліній НВН за рахунок їх довжини, конструкції та напруги. Описані методи знаходження струмів та напруг на початку і в кінці «довгих ліній» за допомогою диференційних рівнянь відіграють важливу роль для аналізу перехідних режимів та знаходження уставок струмів спрацьовування захистів ліній надвисокої напруги.

Такі видатні науковці, як Левіуш О.І. та Доні М.А. у своїх роботах [16], [17] та [18] зазначають про наявність проблем та особливості виконання ДФЗ для ліній 330-750 кВ. Автори підкреслюють важливість виконання компенсації ємнісних струмів для ліній надвисокої напруги довжиною більше 200 км, а також складнощі у виконанні цих рішень на цифровій базі.

У статтях [19] та [20] розглядається аналіз параметрів елементів енергосистеми та моделювання ділянки високовольтної мережі за допомогою середовища Matlab&Simulink. У статті [20] показано моделювання окремого елемента енергосистеми (силового автотрансформатора 750 кВ) та аналізу перехідних процесів при КЗ для вдосконалення диференційного захисту. Ці роботи показують важливість та ефективність застосування моделювання елементів енергомережі для вдосконалення алгоритму роботи релейного захисту.

### **3. Матеріали і методи**

Диференційний струмовий захист – це захист, що оснований на принципі безпосереднього порівняння струмів з різних кінців об'єкту захисту. Даний захист не реагує на зовнішні КЗ та може діяти без витримки часу, тобто працює з абсолютною селективністю.

На диференційному принципі здійснюються поздовжні та поперечні диференційні захисти. У поздовжніх захистах порівнюються струми двох сторін ділянки захисту. Для можливості порівняння струмів використовуються канали зв'язку у вигляді допоміжних дротів, високочастотні або радіо канали. Поперечний захист оснований на

порівнянні струмів однойменних фаз паралельних ланцюгів з подібними параметрами. Поперечний захист має істотний недолік, а саме мертву зону у кінці зони захисту, тому далі розглядається виключно поздовжній захист.

Поздовжні диференційні захисти є двох типів, а саме: прямого порівняння струмів – із застосуванням допоміжних проводів (малі відстані, до 100 км), та непрямого порівняння – із застосуванням високочастотних каналів передачі сигналів (великі відстані, понад 100 км).

Основними перевагами поздовжнього захисту ліній є: абсолютна селективність, швидкодія, нечутливість до хитань та асинхронного ходу в мережі, відносно простий у виконанні та надійний. Головним недоліком цього захисту є канали зв'язку, пошкодження яких призводить до виходу захисту з роботи або його неселективної дії. Вартість захисту переважно залежить від вартості допоміжних дротів або ВЧ каналу.

В сучасних мережах для повітряних ліній напругою 110-330-750 кВ великої довжини у якості основного захисту використовуються ВЧ захисти, а саме ДФЗ. Даний захист оснований на безпосередньому порівнянні фаз струмів з різних кінців лінії, що захищається. Зв'язок між кінцями лінії забезпечується струмами високої частоти (зазвичай 50-300 кГц), які передаються по проводах цієї ж лінії. Струми високої частоти генеруються і обробляються за допомогою спеціальних прийомо-передавачів. Для передачі ВЧ сигналів проводами лінії електропередачі на кінцях ділянки, встановлюються загороджувачі, конденсатори, фільтри приєднання та високочастотні кабелі. Даний тип захисту вимагає лише один ВЧ канал, що є його перевагою.

В мережах для захисту повітряних ліній напругою 330-750 кВ великої довжини застосовується також НВЧЗ.

Можна відмітити основні особливості принципів роботи цих захистів:

- диференційно-фазні струмові захисти оснований на принципі безпосереднього порівняння фаз струмів на кінцях ділянки захисту;
- направлені ВЧ захисти оснований на принципі непрямого порівняння знаків потужності на кінцях ділянки захисту.

#### *Аналіз захистів ДЗФ та НВЧЗ*

*ДФЗ.* Принцип дії ДФЗ заснований на порівнянні фаз струмів на кінцях лінії непрямым шляхом, а саме за рахунок струмів високої частоти.

За принципом дії ДФЗ не реагує на навантаження та качання в лінії, так як в цих режимах струми на обох кінцях лінії протилежні.

Основні елементи ДФЗ:

- пусковий орган, який пускає генератор високої частоти (ГВЧ) та дозволяє діяти захисту при КЗ;

- орган маніпуляції, який керує ГВЧ в залежності від напрямку струму;

- орган порівняння фаз струмів, який діє на вимкнення при збігу фаз струмів на обох кінцях лінії.

Основні переваги даного захисту, це:

- висока швидкодія, чутливість та селективність роботи;

- неспрацьовування при качаннях та неповнофазних режимах.

Недоліки:

- високі вимоги до високочастотного каналу передачі даних для довгих ліній надвисокої напруги;

- складність виконання.

*НВЧЗ.* Принцип дії НВЧЗ заснований на блокуванні роботи захисту при зовнішньому КЗ за рахунок контролю напрямку потужності. Основні елементи захисту: пусковий орган, орган направлення потужності і реле блокування (реле спрацювання або неспрацювання захисту).

Основні переваги даного захисту:

- висока швидкодія, чутливість та селективність роботи;

- менші вимоги до високочастотного каналу передачі даних для довгих ліній надвисокої напруги.

Недоліком даного захисту є:

- можливість спрацювання захисту при качаннях та неповно фазних режимах автоматичного вмикання резерву (ОАПВ);

- складність виконання.

*Переваги ДФЗ.* В неповнофазних режимах (режим ОАПВ) та качаннях ДЗФ працює більш надійно на відміну від НВЧЗ.

*Переваги НВЧЗ.* Більша швидкодія НВЧЗ, ніж ДФЗ для ліній надвисокої напруги. НВЧЗ у повнофазному режимі при використанні реле напрямку потужності зворотної послідовності (РНПЗП). З 3-х фазною схемою порівняння величин спрацювання забезпечується час роботи захисту менше одного періоду промислової частоти (менше 20 мс).

Важливо, що завадостійкість направленої захисту на спрацювання (по ВЧ каналу) за принципом дії виявляється значно вище, ніж у ДФЗ, оскільки ДФЗ спрацює під час паузи між ВЧ пакетами прийомо-передавачів. При КЗ в зоні захисту у направленої захисту обидва передатчика не надсилають сигнали ВЧ блокування і умова його спрацювання виходить краще, ніж у ДФЗ. Вказане особливо важливо для ліній НВН великої протяжності, де виникають труднощі із

забезпеченням необхідних запасів перекирвання затування ВЧ каналу.

Також, при зовнішньому КЗ для блокування направленою захисту висувається менше умов (спрацьовування органу напрямку потужності з однієї сторони), ніж ДФЗ, де більш жорсткі умови (до того ж захисти з обох кінців повинні працювати погоджено). Ось чому в панелях захисту ліній типу ПДЕ-2003 використовуються комбінація вказаних захистів, а саме: для симетричного режиму пошкодження – працює НВЧЗ, а для несиметричного режиму (ОАПВ) – працює ДФЗ.

*Цифрові пристрої захисту.* Із розвитком технологій розглянуті типи захистів з електромеханічної елементної бази переходять до цифрової. Сучасні технології виконання захистів мають багато переваг перед застарілими. З основних це: точність спрацьовування, швидкодія, універсальність функціонування, зменшення габаритів та споживання енергії. Основними недоліками є:

- зниження надійності функціонування за рахунок меншого часу напрацювання на відмову цифрових елементів;
- значна концентрація захисних функцій на одному пристрої, вихід з ладу такого пристрою призводить до втрати усіх захистів;
- ускладнення експлуатації за рахунок більш високої вимоги до кваліфікації персонала.

Наразі в мережі ОЕС України для захисту ліній 330-750 кВ застосовуються наступні поширені типи панелей захисту та автоматики (РЗА) із використанням функції ДФЗ та НВЧЗ:

- електромеханічні (типу ДФЗ-503, ДФЗ-504);
- напівпровідникові (типу ПДЕ-2003, ПДЕ-2004);
- цифрові пристрої (типу L60, Діамант L040).

В наш час продовжується тенденція по заміні всіх застарілих електромеханічних та напівпровідникових пристроїв РЗА, які фізично відпрацювали свій ресурс на цифрові пристрої.

*Порівняння ДФЗ на електромеханічній, напівпровідниковій та цифровій елементній базі.* Виконання даного захисту на різних елементних базах має свої особливості. Основними відмінностями є виконання основних органів захисту, таких як пускові органи, органи управління та порівняння фаз. Для визначення основних параметрів спрацьовування застосовуються різні фільтри, наприклад симетричних складових, гармонійних складових. Різна елементна база основних органів захисту вносить зміни в алгоритм роботи захисту. Це спричиняє складнощі при їхній сумісній роботі, які необхідно вирішувати також.

*Реалізація принципів ДФЗ на цифровій базі.* В сучасних цифрових пристроях захисту, таких як L60 та Діамант L040 реалізовано принцип роботи ДФЗ. З досвіду експлуатації відомо, що такий алгоритм роботи ДФЗ для цих пристроїв на лініях НВН працює неселективно або з великими часом спрацьовування, що спливає на стійкість енергосистеми.

Алгоритм роботи диференційного захисту, аналогічний тому що реалізовано у панелі типу ПДЕ-2003, яка вже має великий термін успішної експлуатації, на базі цифрових пристроїв не реалізовано. Тому аналіз алгоритму роботи панелі типу ПДЕ-2003 на лініях НВН з його адаптацією на базі цифрових пристроїв захисту є актуальною науковою задачею.

#### 4. Результати дослідження

У розглянутих наукових роботах освітлюються наявності проблем швидкодії та чутливості захистів для ліній НВН великої потужності. Наголошується, що існуючі типові захисти не справляються із викликами сучасності, які пов'язані зі змінами в енергомережах за рахунок впровадження відновлювальних джерел енергії та необхідності передачі великої потужності на далекі відстані. У статтях [1–13] показано нові принципи виконання типових захистів, які є поки що теоретичними або експериментальними моделями. Автори робіт аналізують результати досліджень та показують переваги нових принципів виконання захистів. В основному, ці захисти розглядаються для потужних енергомереж країн із великою територіями, такими як США, Канада, Китай, Колумбія, Франція, Індія, Пакистан. Розглянуті нові принципи для диференційного захисту цих мереж пов'язані із використанням провідного волоконно-оптичного каналу зв'язку або ж супутникового зв'язку. Можна відзначити, що в роботах не робиться акцент на розгляд самого каналу зв'язку передачі сигналів між комплектами захистів на кінцях лінії. Проте принцип виконання захисту прямо залежить від каналу передачі сигналів. Тому для різних країн, які починали впроваджувати захисти своїх енергомереж, дуже важливим є прив'язка до концепцій наявних каналів зв'язку. Це особливо важливо для ліній надвисокої напруги, так як, наприклад, вартість виконання високочастотного каналу і волоконно-оптичного буде суттєво відрізнятися.

В Україні від самого початку впроваджувались високочастотні канали зв'язку і на даний момент вони є набагато дешевшими в порівнянні із волоконно-оптичними. Треба зазначити, що у

вітчизняних мережах НВН також є досвід застосування волоконно-оптичного каналу на нових лініях, але там є свої особливості при довжинах ліній більше 150 км. Наразі в енергосистемі України є лінії надвисокої напруги довжиною більше 250-350 км, де використовується ВЧ канал зв'язку. В роботах [14–22] підкреслюються особливості ВЧ захистів та їх проблематика. Тому для НВН мереж України є актуальним розгляд нових підходів виконання цифрових диференційних захистів, які використовують високочастотний канал зв'язку.

Для підвищення точності визначення параметрів спрацьовування захисту необхідне математичне моделювання перехідних процесів мережі та практичне дослідження роботи алгоритму спрацьовування захисту в умовах, наближених до реальних. Тому актуальною є задача створення нового методу визначення параметрів спрацьовування захисту ЛЕП НВН великої протяжності, який враховував би перехідні процеси у всіх необхідних режимах, математичної та експериментальної моделі роботи методу.

Ефективним способом для аналізу перехідних процесів при коротких замиканнях в мережі з даною конфігурацією є побудова математичної моделі ділянки мережі в програмному комплексі. Завдяки новому алгоритму захисту та математичній моделі можна аналізувати та вдосконалювати роботу захисту для різних режимів мережі.

## 5. Висновки

На основі аналізу науково-технічної літератури підтверджено актуальність проблеми виконання захистів ліній надвисокої напруги на цифровій елементній базі. Зазначено про складнощі застосування диференційного захисту на довгих лініях надвисокої напруги 330-750 кВ із використанням цифрової елементної бази.

Запропоновано нові напрями у вирішенні даної проблеми шляхом вдосконалення алгоритму роботи диференційного захисту ліній для забезпечення стабільності енергосистеми України.

Встановлено, що ефективним способом для вирішення даної задачі є побудова математичної моделі лінії надвисокої напруги та дослідження роботи нового методу захисту таких ліній.

## Список бібліографічних посилань

1. Aboshady, F.M., Saber, A., Khera, F., & Zoubaa, A. (2023). High frequency directional-based protection scheme for transmission lines emanating from large scale wind farms. *Electric Power Systems*

*Research*, 225 (109904). DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109904.

2. Saber, A., Shaaban, M.F., & Zeineldin, H.H. (2022). A new differential protection algorithm for transmission lines connected to large-scale wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 141 (108220). DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108220.

3. Wang, B., & Wang, Z. (2025). A novel principle of frequency characteristics-based current differential protection for outgoing lines of wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 167 (110645). DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.110645.

4. Hou, J., Gao, Q., Fan, Y., Song, G., Wu, X., Yang, W. ... Peng, F. (2025). Improved differential protection for two-terminal weak feed AC system considering negative sequence control coordination strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 164 (110396). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110396.

5. Shi, Z., Yu, J., & Ding, X. (2022). Research on transient protection based on time-frequency domain features. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*. Shenyang, China. IEEE. DOI: 10.1109/AUTEEE56487.2022.9994368.

6. Tang, Y., Shu, H., Dai, Y., & Han, Y. (2024). Enhanced pilot protection scheme for half-wavelength transmission line based on the conservation of traveling wave energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 161 (110184). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110184.

7. Moro, A.F.N.C., Ortega, J.S., & Tavares, M.C. (2022). Performance evaluation of power differential protection applied to half-wavelength transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 209 (107998). DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107998.

8. Garzón, A., Celeita, D., Ramos, G., Petit, M., Le, T.D., Hoyos, J.P., & Bach, A. (2025). Comparative analysis of impedance and time-domain protection in HVAC and HVDC interconnected systems: A case study in Colombia. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11 (100880). DOI: 10.1016/j.prime.2024.100880.

9. Zhou, B., Li, B., He, J., Li, Y., Xie, Z., & Dai, W. (2024). A novel high-sensitivity time-domain current differential protection scheme for renewable power transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160 (110083). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110083.

10. Zhang, Y., Yu, Y., & Yang, G. (2025). Adaptive current differential protection principle for transmission line connected to energy storage power station based on phase and amplitude compensation.

*Journal of Energy Storage*, 111 (115468). DOI: 10.1016/j.est.2025.115468.

11. Jain, R., Velaga, Y.N., Prabakar, K., Baggu, M., & Schneider, K. (2022). Modern trends in power system protection for distribution grid with high DER penetration. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2 (100080). DOI: 10.1016/j.prime.2022.100080.

12. Ovcharenko, N.I. (2002). Differential'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy elektropredachi napryazheniyem 110 – 220 kV DFZ-201. *Energetic*. 12 (48).

13. Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite: *Differentsial'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy 110-330 kV*. (1972). 9. M.: Energiya.

14. *Rekomendatsii po vyboru ustavok differentsial'no-faznoy zashchity liniy tipa L60 V.4.8X*. (2005). Kiyev: GE MULTILIN.

15. *Ustroystvo differentsial'no-faznoy zashchity linii L60*. (2013). Rukovodstvo: 1601-0212-X1 (GEK-119605). GE Multilin.

16. Leviush, A. I., Medvedeva, L. N., & Sapir, Y. D. (1973). Printsipy vypolneniya odnoperiodnoi vysokochastotnoi zashchity VL 750 kV. *Elektrichestvo*, 8, 1–9.

17. Doni, N. A., Leviush, A. I., Tonkikh, E. V., & Uzhegov, V. T. (2003). O predel'nykh dlinakh VL, zashchishchaemykh differentsial'no-faznymi zashchitami bez ustroystv kompensatsii yemkostnykh tokov. *Elektricheskiye stantsii – Energoprogress*, 2, 34–36.

18. Doni, N. A., & Leviush, A. I. (2013). Osobennosti mikroprotessornoi bystrodeistvuyushchei napravlennoi differentsial'no-faznoi zashchity VL 330-750 kV. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2, 25–26.

19. Савельев, А. А. (2022). Розроблення та моделювання інформаційної системи керування параметрами повітряних ліній електропередачі в програмі «Simulink». *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 36 (112), 27–39.

20. Яндульский, О. С., Марченко, А. А., & Заколюдажний, В. В. (2011). Підвищення ефективності релейного захисту автотрансформаторів 750 кВ із поздовжньо-поперечним регулюванням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 6, 138–141.

## References

1. Aboshady, F.M., Saber, A., Khera, F., & Zoba, A. (2023). High frequency directional-based protection scheme for transmission lines emanating from large scale wind farms. *Electric Power Systems*

*Research*, 225 (109904). DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109904.

2. Saber, A., Shaaban, M.F., & Zeineldin, H.H. (2022). A new differential protection algorithm for transmission lines connected to large-scale wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 141 (108220). DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108220.

3. Wang, B., & Wang, Z. (2025). A novel principle of frequency characteristics-based current differential protection for outgoing lines of wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 167 (110645). DOI:10.1016/j.ijepes.2025.110645.

4. Hou, J., Gao, Q., Fan, Y., Song, G., Wu, X., Yang, W. ... Peng, F. (2025). Improved differential protection for two-terminal weak feed AC system considering negative sequence control coordination strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 164 (110396). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110396.

5. Shi, Z., Yu, J., & Ding, X. (2022). Research on transient protection based on time-frequency domain features. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*. Shenyang, China. IEEE. DOI: 10.1109/AUTEEE56487.2022.9994368.

6. Tang, Y., Shu, H., Dai, Y., & Han, Y. (2024). Enhanced pilot protection scheme for half-wavelength transmission line based on the conservation of traveling wave energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 161 (110184). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110184.

7. Moro, A.F.N.C., Ortega, J.S., & Tavares, M.C. (2022). Performance evaluation of power differential protection applied to half-wavelength transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 209 (107998). DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107998.

8. Garzón, A., Celeita, D., Ramos, G., Petit, M., Le, T.D., Hoyos, J.P., & Bach, A. (2025). Comparative analysis of impedance and time-domain protection in HVAC and HVDC interconnected systems: A case study in Colombia. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11 (100880). DOI: 10.1016/j.prime.2024.100880.

9. Zhou, B., Li, B., He, J., Li, Y., Xie, Z., & Dai, W. (2024). A novel high-sensitivity time-domain current differential protection scheme for renewable power transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160 (110083). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110083.

10. Zhang, Y., Yu, Y., & Yang, G. (2025). Adaptive current differential protection principle for transmission line connected to energy storage power station based on phase and amplitude compensation.

*Journal of Energy Storage*, 111 (115468). DOI: 10.1016/j.est.2025.115468.

11. Jain, R., Velaga, Y.N., Prabakar, K., Baggu, M., & Schneider, K. (2022). Modern trends in power system protection for distribution grid with high DER penetration. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2 (100080). DOI: 10.1016/j.prime.2022.100080.

12. Ovcharenko, N.I. (2002). Differential'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy elektropredachi napryazheniyem 110 – 220 kV DFZ-201. *Energetic*. 12 (48).

13. Rukovodyashchie ukazaniya po releyroy zashchite: *Differentsial'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy 110-330 kV*. (1972). 9. M.: Energiya.

14. *Rekomendatsii po vyboru ustavok differentsial'no-faznoy zashchity liniy tipa L60 V.4.8X*. (2005). Kiyev: GE MULTILIN.

15. *Ustroystvo differentsial'no-faznoy zashchity linii L60*. (2013). Rukovodstvo: 1601-0212-X1 (GEK-119605). GE Multilin.

16. Leviush, A. I., Medvedeva, L. N., & Sapir, Y. D. (1973). Printsipy vypolneniya odnoperiodnoi

vysokochastotnoi zashchity VL 750 kV. *Elektrichestvo*, 8. 1–9.

17. Doni, N. A., Leviush, A. I., Tonkikh, E. V., & Uzhegov, V. T. (2003). O predel'nykh dlinakh VL, zashchishchaemykh differentsial'no-faznymi zashchitami bez ustroystv kompensatsii yemkostnykh tokov. *Elektricheskiye stantsii – Energoprogress*, 2, 34–36.

18. Doni, N. A., & Leviush, A. I. (2013). Osobennosti mikroprotssornoj bystrodeistvuyushchei napravlennoi differentsial'no-faznoi zashchity VL 330-750 kV. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2, 25–26.

19. Savieliev, A. A. (2022). Development and modeling of an information system for controlling parameters of overhead power lines in the program "Simulink". *Electrotechnic and Computer Systems*, 36 (112), 27–39.

20. Yandulskyi, O. S., Marchenko, A. A., & Zakolodiaznyy, V. V. (2011). Increase of efficiency of relay protection of autotransformers 750 kV with the longitudinally-transversal adjusting. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 6, 138–141.

## Analysis of the Features of Implementing Differential Protections of Extra High Voltage Power Transmission Lines

Andrii Topor, Mykhailo Shabovta  
Odesa Polytechnic National University

**Abstract.** Nowadays, there is a need for constant analysis of the operation of relay protection and improvement of the principles of its implementation, due to the fact that microprocessor technologies are rapidly developing and being implemented in relay protection. The purpose of the research is to develop directions for improving protection and ensuring the correct operation of differential-phase protection of 750 kV lines based on microprocessor devices. Therefore, the objectives of this study are an in-depth analysis of the principle of operation of this protection and determining directions for solving the problem. The scientific value is to actualize the problem for improving the algorithm of operation of differential-phase high-frequency protection of extra-high voltage lines. The practical significance of the research lies in increasing the efficiency of relay protection of the country's power system. There is used the method of analysis of the available scientific and technical literature to identify the problem in this paper. There are considered both existing protections and the principles of their operation, as well as new theoretical and experimental models of protections that have not yet been implemented. The characteristics of protections and the features of the scope of application are analyzed. Difficulties were identified in implementing the differential phase protection algorithm in microprocessor terminals specifically for long extra-high voltage lines of 330-750 kV. Lines of this voltage have a large capacitive component, which leads to the appearance of complex transients. These processes affect both the value of the measured parameters and the quality of the signal transmitted over the high-frequency channel. All this affects the selectivity of operation and increases the time of protection operation, thereby reducing the stability of the power system. The result of the research is confirmation of the relevance of the problem and the determination that an effective way to solve this problem is to build a mathematical model of the research object for further in-depth consideration. There was established that the problem of implementing microprocessor protection of extra-high voltage lines is not solved based on the analysis of scientific and technical literature. New directions in solving this problem are proposed by improving the algorithm of protection to ensure the stability of the unified power system of Ukraine.

*There is established that an effective way to solve this problem is to build a mathematical model of a specific extra-high voltage line of Ukraine and study the operation of a new method of protecting such lines.*

**Keywords:** relay protection, differential protection, differential-phase protection, high-frequency protection, extra-high voltage line, transients, short circuits, modeling, power system.

Отримано 03.07.2025



**Топор Андрій Костянтинович**, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [topor\\_ak@stud.op.edu.ua](mailto:topor_ak@stud.op.edu.ua); тел. +38 066 947 8985

**Andrii Topor**, PhD Student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: [topor\\_ak@stud.op.edu.ua](mailto:topor_ak@stud.op.edu.ua); ph.: +38 066 947 8985

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0009-0005-9862-3867>



**Шабовта Михайло Юрійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: [shabovta@opu.ua](mailto:shabovta@opu.ua); тел. +38 099 641 7990

**Mykhailo Shabovta**, PhD, Assistant professor of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail [shabovta@opu.ua](mailto:shabovta@opu.ua), ph.: +38 099 641 7990

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1950-2161>