

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ТА СИСТЕМ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.В.Кирик  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломний проект**  
**на здобуття ступеня «бакалавр»**  
(назва ОКР)

Спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Застосування обмежувачів перенапруги в мережах 750 кВ»

Виконав: студент 3 курсу, групи ЕС-п71  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Фурман Ілля Юрійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник проекту: доцент, к. т. н. Кацадзе Т. Л.  
(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу ДП) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра електричних мереж та систем

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Електричні системи і мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.В. Кирик  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проект студенту**  
**Фурман Ілля Юрійович**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Застосування обмежувачів перенапруги в мережах», керівник проекту Кацадзе Теймураз Луарсабович, к. т. н., доцент, затверджені наказом по університету від 28 квітня 2020 р. №1047-с.
2. Строк подання студентом проекту 9 червня 2020 р.
3. Вихідні дані до проекту:
  - Номінальна напруга:  $U_{ном} = 750 \text{ кВ}$  ;
  - Довжина ЛЕП:  $L = 363 \text{ км}$  ;
  - Крок розчеплення фази:  $a = 600 \text{ мм}$  ;
  - Відстань між проводами при горизонтальному розміщенні:  $D=19.5 \text{ м}$
  - Марка проводу: АС-400/93
  - Крок розчеплення фази:  $a = 600 \text{ мм}$

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

- 1) Загальна інформація про дальні лінії електропередач в світі та в Україні;
- 2) Особливості режиму напруги в дальніх лініях електропередач на прикладі лінії Західноукраїнська-Вінницька;
- 3) Застосування обмежувачів перенапруги в дальніх лініях електропередач.

5. Перелік графічного матеріалу

- 1) Презентація

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі 21 квітня завдання 2020 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Загальна інформація про дальні лінії електропередач в світі та в Україні	21.04.20 – 10.05.20	
2	Особливості режиму напруги в дальніх лініях електропередач на прикладі лінії Західноукраїнська-Вінницька	11.05.20 – 19.05.20	
3	Застосування обмежувачів перенапруги в дальніх лініях електропередач	20.05.20 – 06.06.20	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Фурман І.Ю.

Керівник проекту

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кацадзе Т.Л.

**Пояснювальна записка  
до дипломного проекту**

на тему: «Застосування обмежувачів перенапруги в мережах»

Київ – 2020 рік

## Реферат

Дипломний проект містить: сторінок – 67, рисунків – 16, таблиць – 11, креслень – 3.

Мета та задачі роботи. Метою даного дипломного проекту є розгляд дальніх ліній електропередачу у світі та в Україні, а також застосування ОПН в лініях 750 кВ змінного струму на прикладі реальної лінії електропередач «Вінниця – Західноукраїнська».

Для досягнення поставленої мети в дипломному проекті були вирішенні наступні задачі:

1. Провести аналіз літературних джерел стосовно існуючих дальніх ліній електропередач.
2. Провести дослідження лінії електропередач «Вінниця – Західноукраїнська» в різних режимах її роботи.
3. Провести аналіз літературних джерел стосовно існуючих обмежувачів перенапруг. Оглянути їх конструкції, принцип дії, класифікацію та основні технічні характеристики.

Об'єкт дослідження – передача електричної енергії на змінному струмі класу напруги 750 кВ та вище на дальні відстані.

## Summary

The graduation project contains pages - 68, figures - 16, tables - 11 drawings - 3.

The purpose and objectives of the work. The purpose of this thesis project is to consider long-distance power lines in the world and in Ukraine, as well as the use of surge arresters in 750 kV AC lines using the example of a real «Vinnitsa-Zapadnoukrinskaya» power line.

To achieve the goal in the graduation project, the following tasks were solved:

1. To analyze the literature on existing long-distance power lines.
2. To conduct a study of the power line "Vinnitsa - Zapadnoukrinskaya" in various modes of its operation.
3. To analyze the literature on the existing surge suppressors. Inspect their designs, operating principle, classification and basic technical characteristics.

The object of study is the transmission of electrical energy by alternating current of voltage class 750 kV and higher over long distances.

# Зміст

Вступ.....	8
1. Загальна інформація про дальні лінії електропередач в світі та в Україні.....	9
Висновок до розділу 1.....	15
2. Особливості режиму напруги в дальніх лініях електропередач на прикладі лінії Західноукраїнська-Вінницька.....	16
2.1 Розрахунок параметрів еквівалентної фази .....	18
2.2. Визначення параметрів схем заміщення елементів електропередачі .....	21
2.3. Параметри реакторів напругою 750 кВ .....	22
2.4. Дослідження ДЕП в різних режимах її роботи.....	24
2.5. Робочі характеристики лінії «Вінниця – Західноукраїнська».....	39
Висновок до розділу 2.....	42
3. Застосування обмежувачів перенапруги в дальніх лініях електропередач.....	43
3.1. Загальні відомості про обмежувачі перенапруги .....	43
3.2. Класифікація обмежувачів перенапруги .....	44
3.3. Конструкція обмежувачів перенапруги.....	46
3.4. Основні технічні характеристики ОПН 750 кВ .....	49
3.5. Місця установки ОПН уздовж траси повітряної лінії.....	50
3.6. Місця установки ОПН на одноколових опорах.....	52
3.7. Основні типи ОПН і спосіб їх приєднання до ПЛ.....	56
3.8. Типові та особливі випадки застосування ОПН 110-750 кВ.....	59
Висновок до розділу 3.....	62
Висновки по роботі .....	63
Література .....	64

					ДПп7110.141.010	ПЗ				
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.		Фурман І.Ю			Застосування обмежувачів перенапруги в мережах 750 кВ. Пояснювальна записка	Лит.	Лист	Листов		
Провер.		Кацадзе Т.Л.					7	65		
Реценз						НТУУ «КПІ» ФЕА, гр. ЕС-п71				
Н. Контр.										
Утверд.										

## Вступ

Електропередачі надвисоких напруг грають важливу роль в сучасній енергетиці, забезпечуючи видачу потужності від великих електростанцій і будучи сполучними ланками в єдиній енергосистемі країни.

У сучасній електроенергетиці можна виділити два типи ліній електропередачі - магістральні електропередачі, призначені для передавання великих потужностей на значні відстані, і лінії розподільчої мережі, за якими електроенергія доставляється безпосередньо до споживачів. За минулі понад 100 років з моменту появи перших електропередач і по теперішній час в їх конструкції і їх електричних характеристиках відбулися великі зміни.

Напруги і потужності електропередач безперервно ростуть. Якщо ще порівняно недавно вважалося, що гранична дальність електропередачі не перевищує 400 км і максимальне напруження не може бути вище 330 кВ, то тепер ці межі істотно розширилися.

Зараз споруджуються електропередачі напругою 1150 кВ змінного струму і 1500 кВ постійного струму і ведуться опрацювання електропередач ще більш високих напруг. Відстань, на яке може передаватися електроенергія, вже зараз далеко перевищує 1000 км.

Метою даного дипломного проекту є розгляд застосування ОПН в лініях 750 кВ на прикладі реальної лінії електропередач «Вінниця – Західноукраїнська».

Для досягнення мети були розв'язанні такі задачі:

1) Дослідження лінії в різних режимах її роботи, а саме:

- Режим синхронізації;
- Режим холостого ходу;
- Режим максимальних навантажень з різними активними та реактивними навантаженнями за умовами кінця.

2) Аналіз розподілення навантаження повздовж усєї лінії

3) Побудова графіку робочих характеристик ДЕП

4) Застосування ОПН в ДЕП

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			8

# 1. Загальна інформація про дальні лінії електропередач в світі та в Україні

Електроенергетичні системи у всіх країнах світу розвивалися і продовжують розвиватися від ізольованих локальних систем, що живлять місцеві навантаження, до потужних енергооб'єднання, що зв'язує концентровані та розподілені джерела електроенергії і споживачів в мережу змінного струму.

Переваги об'єднання електроенергетичних систем (ЕЕС), а також необхідність передачі електроенергії від віддалених джерел до центрів електроспоживання привели до появи далеких електропередач (ДЕП). Під ДЕП розуміється ЛЕП, оснащена комплексом технічних засобів, що забезпечують підвищену пропускну здатність і можливість стійкої паралельної роботи окремих частин об'єднаної енергосистеми (ОЕС), незважаючи на великі відстані між ними.

У системах змінного струму з великою кількістю електростанцій існує проблема підтримки синхронної роботи всіх генераторів. Сталий стан такої системи в нормальних режимах роботи визначається технічними параметрами системи, що забезпечують здатність системи протистояти збурень режиму. Особливого значення набуває проблема стійкості синхронної (паралельної) роботи декількох енергосистем, об'єднаних міжсистемними зв'язками.

Недостатня пропускну здатність міжсистемних зв'язків (з малим запасом стійкості) в ситуаціях різкого зростання навантажень, короткого замикання, раптового відключення генеруючих і передавальних елементів системи може призводити до порушення статичної стійкості (при малих збуреннях) і динамічної стійкості (при різких і глибоких порушеннях нормального режиму). Внаслідок порушення стійкості відбувається випадання генераторів із синхронізму, що може привести до розпаду енергосистем, що входять в енергооб'єднання, на несинхронні частини з важкими економічними наслідками для споживачів електроенергії.

Стійкість систем є основним чинником, що обмежує пропускну здатність електропередач змінного струму великої протяжності, близькою до довжини чверті

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			9

хвилі поширення електромагнітного поля вздовж лінії (1500 км при промисловій частоті 50 Гц або 1250 км при частоті 60 Гц).

За наведених причин дальніх ліній електропередач змінного струму не так багато в світі але вони є.

### Росія

Будівництво ЛЕП 1150 кВ Ітат - Барнаул - Екібастуз - Кокчетав - Кустанай - Челябінськ було завершено в 1988 році (усі ділянки наведені в таблиці 1.1). На жаль, кризова ситуація, що склалася після розпаду СРСР, не дозволила повністю використовувати пропускну транзитну (на номінальну напругу 1150 кВ в кінці 80-х років працювали тільки дві ділянки на отримання транзитної візи Екібастуз - Кокчетав і Кокчетав - Кустанай). В даний час всі лінії цього транзиту вони працюють на напрузі 500 кВ. [1]. На рисунку 1.1 наведена ця ЛЕП.



Рис.1.1. Схема ЛЕП 1150 кВ змінного струму Сибір-Казахстан-Урал і 1500 кВ ( $\pm 750$  кВ) постійного струму Екібастуз-Центр (пунктир)

Лінія електропередачі Екібастуз - Кокшетау - ділянку унікальною високовольтної лінії електропередачі змінного струму «Сибір - Центр» проектного

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			10

напруги 1150 кВ. Протяжність ділянки - 432 кілометри, змонтований на опорах із середньою висотою 45 метрів. Застосовується розщеплення фаз: кожна фаза складається з 8 проводів, що утворюють в перерізі правильний восьмикутник.

Таблиця 1.1. Ділянки лінії електропередачі змінного струму «Сибір – Центр»

Маршрут	Довжина, км	Початок будування	Введена в експлуатацію
Экибастуз – Кокчетав	494	1981	1983
Кокчетав – Кустанай	396	1981	1988
Кустанай – Челябинск	321	1981	1988
Барнаул – Экибастуз	693	1981	1988
Итат – Барнаул	440	1981	1988
Всього	2344		

Казахська ділянка Екібастуз - Кокшетау - Костанай близько трьох років працювала на номінальній напрузі, проте потім було прийнято рішення про переведення на напругу 500 кВ.

### **Японія**

Японія почала планувати в 1970-х роках і початку дослідження технологій СВЧ в 1980-х роках для будівництва двох ліній електропередачі 1000 кВА (схід-захід і північ-південь) для подачі електроенергії з АЕС Фукусіма-Даїчі і Дайна (з встановлена потужність 4700 МВт і 4400 МВт відповідно) розташована на узбережжі Тихого океану і на АЕС Касівадзакі-Каріва з встановленою потужністю 8120 МВт для центрів навантаження Токійської затоки. Ці дві лінії протяжністю 427,2 км були завершені із запланованою пропускнуною спроможністю понад 10 000 МВт.[5]

Ці дві лінії, обмежені будівництвом великої ядерної енергетичної бази, в даний час працюють на 500 кВ.

### **Китай**

У грудні 1981 року було завершено перший проект передачі Піндінгшан-Учан 500 кВ, який був незалежно спроектований і побудований Китаєм. Цей проект

починається з електростанції Yaomeng в Піндінгшане, провінція Хенань, і закінчується на підстанції Fenghuanshan в Учан, що проходить через Шанхай.

У проекті передачі і трансформації 500 кВ Баошань - Цзіньчжоу - Ляоян - Хайчен повністю використовувалося обладнання 500 кВ китайського виробництва. Цей проект був введений в експлуатацію на ділянках і повністю введений в експлуатацію в 1985 році.[3]

22 серпня 2008 року був завершений і введений в експлуатацію другий проект з передачі електроенергії 750 кВ (схід Ланьчжоу - схід Іньчуань). Довжина цієї лінії електропередачі становить 394 км.

9 серпня 2006 року було затверджено перший пілотний і демонстраційний проект лінія надвисокої напруги змінного струму 1000 кВА Цзіньдуннань-Наньян-Цзіньмень для будівництва, принципова схема наведена на рисунку 1.2. Цей проект має номінальну системну напругу 1000 кВ і максимальна робоча напруга 1100 кВ. 6 січня 2009 року проект був введений в експлуатацію.

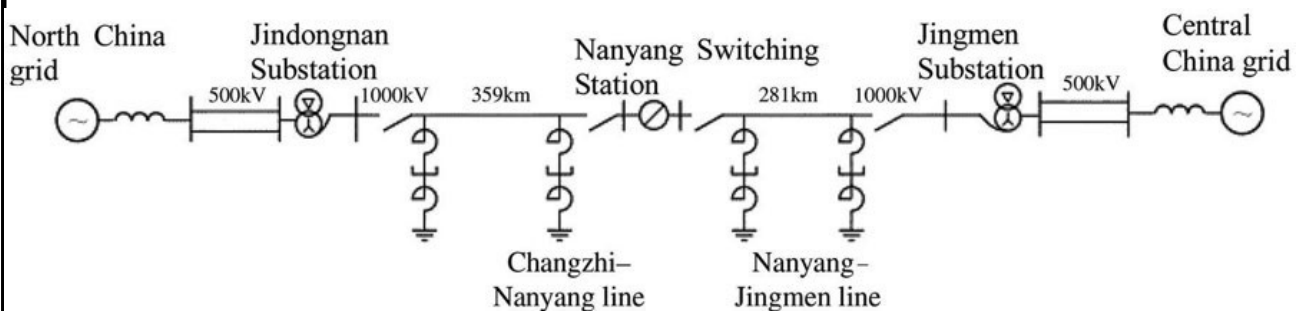


Рис 1.2. Принципова схема підключення лінії надвисокої напруги змінного струму 1000 кВА Jindongnan-Nanyang-Jingmen.

Ще одним проектом є лінія надвисокої напруги Хуайнань-Південний Аньхой-Північний Чжецзян-Західний Шанхай[4]:

- лінія Хуайнань-Південний Аньхой має довжину 326,5 км,
- лінія Південний Аньхой-Північний Чжецзян має довжину 151 км, а
- лінія Північний Чжецзян - Західна Шанхайська лінія довжиною 165 км

Загальна довжина становить 642,5 км. Земля уздовж всієї лінії плоска з висотою нижче 1000 м. Найбільша висота над рівнем моря становить 480 м, розташована в гірському районі на півночі провінції Чжецзян.

На рисунку 1.3 наведено мережу магістральних ліній електропередач в Китаї.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			12

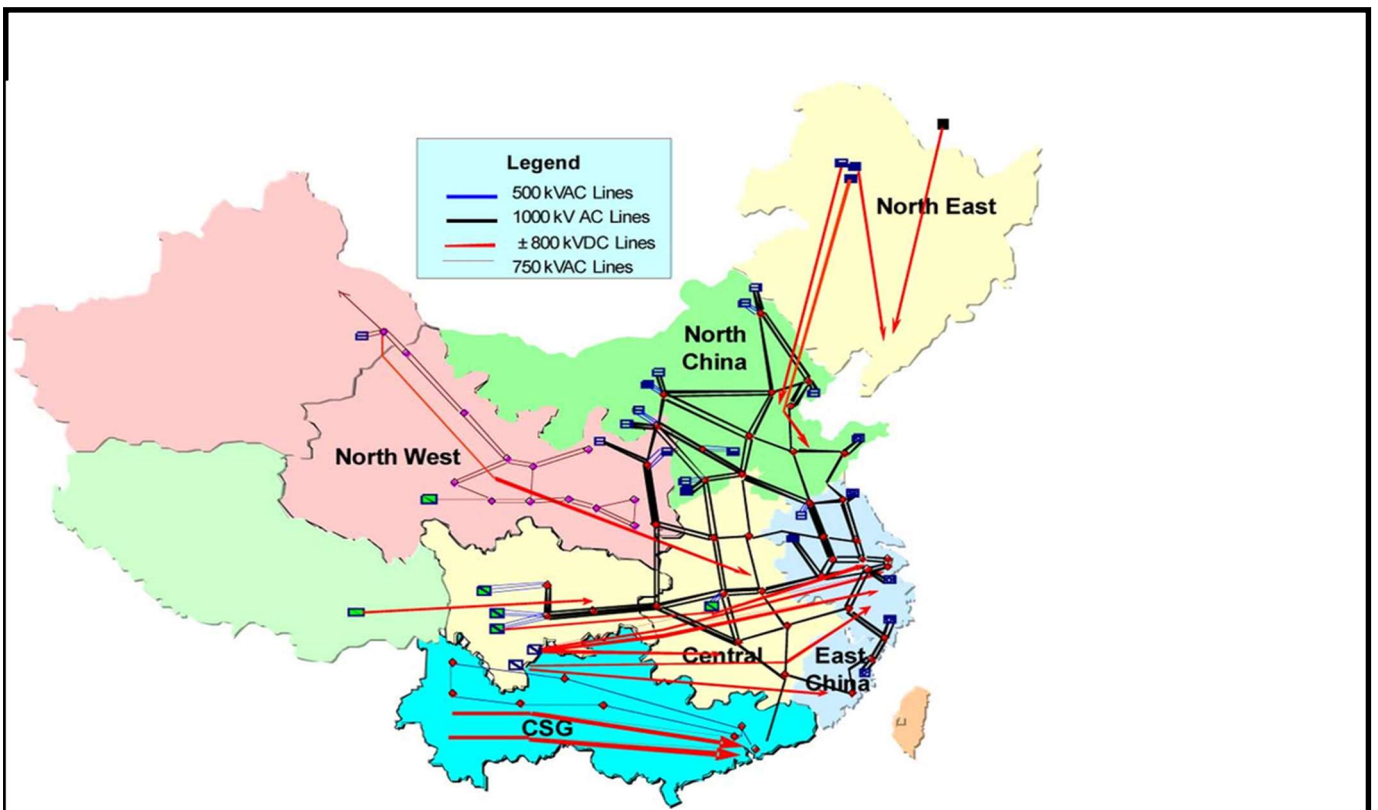


Рис. 1.3. Мережа магістральних ліній електропередавання в Китаї

### Канада

У східній частині країни досить широко розвинена мережа напругою 735 кВ, в західній - 500 кВ. Розвиток мережі 735 кВ викликано необхідністю видачі потужності однієї з найбільших в світі ГЕС на р. Черчилл потужністю 5,2 ГВт, а також каскаду ГЕС на р. Св. Лаврентія.

#### *Вабамун-Альта до форту Мак-Мюррей*

Ця лінія електропередачі протяжністю 508 км, що йде від Вабамун-Альта до форту Мак-Мюррей, забезпечує необхідною кількістю електричества, більшою надійністю і поліпшує систему передачі для задоволення зростаючих потреб в північній частині Альберти. Цей проект є найдовшою лінією електропередачі 500 кВ у Канаді і входить в число 50 кращих інфраструктурних проектів в Канаді.[2]

Ще однією ЛЕП змінної напруги високої напруги є одноконтурна лінія електропередачі 500 кВ довжиною близько 400 кілометрів від лінії електропередачі AltaLink Management Ltd. до існуючої підстанції Livock 939S.

### Україна

В Україні відсутні лінії дальніх електропередач, але існують середньої довжини. Саме ці ЛЕП наведені в таблиці 1.2.



У США існує ряд об'єднаних енергосистем, куди входять окремі енергокомпанії, яких налічується більше гріх тисяч. Деякі з цих об'єднань керуються з єдиного диспетчерського пункту, інші просто здійснюють паралельну роботу при координації розподілу навантаження і регулювання частоти. Роль міжсистемних зв'язків і системоутворюючих ліній виконують лінії 345-765 кВ. Ведуться роботи по створенню обладнання для ЛЕП електропередачі 1600 кВ. [6]



Рис. 1.5. Мережа магістральних ліній електропередавання 765 кВ в США

## Висновок до розділу 1

Дальні лінії змінної напруги мають, як велике поширення, так і активний розвиток у будівництві нових ліній по всьому світі. Всі ДЕП змінного струму зазвичай складаються з окремих ділянок які не перевищують довжини 300-500 км. Це наслідки впливу фізики хвильових процесів на лінії електропередач. При збільшенні довжини відчувається запізнення електромагнітної хвилі через обмеження швидкості її поширення вздовж лінії електропередавання.

В Україні Основу магістральної мережі Об'єднаної енергосистеми України становлять лінії напругою 750 кВ. Станом на початок 2018 р. лінії електропередавання такого класу номінальної напруги утворили по дві одноколові петлі в західному та східному регіонах України, з'єднані між собою лінією електропередавання того ж класу напруги. Загальна довжина повітряних ліній напругою 750 кВ перевищує 4,5 тис. км

## 2. Особливості режиму напруги в дальніх лініях електропередач на прикладі лінії Західноукраїнська-Вінницька

У 1971 році почалося поетапне спорудження ліній електропередачі нового класу напруги 750 кВ. Головним призначенням ліній електропередачі 750 кВ було посилення основної мережі Єдиної енергетичної системи (ЄЕС) колишнього СРСР для забезпечення надійної та сталої роботи енергосистем у складі ЄЕС, забезпечення видачі потужності найбільших атомних електростанцій України, підвищення пропускної спроможності міжсистемних зв'язків для збільшення обміну потужністю та енергією між системами, а також для збільшення експорту електроенергії до Східної Європи – до ОЕС «Мир».

Перший етап розвитку електричної мережі напругою 750 кВ в Україні був реалізований в 1971–1975 рр. при спорудженні першої лінії електропередачі 750 кВ у напрямку Донбас – Дніпро – Вінниця – Захід довжиною більше 1120 км. Лінія електропередачі вводилася в експлуатацію окремими регіональними ділянками. Першою була побудована в 1971 році ділянка Дніпро – Вінниця, що тимчасово використовувалася для видачі потужності Ладижинської ДРЕС у Дніпровську енергосистему на напрузі 330 кВ. У 1972 році була побудована ділянка Донбас – Дніпро, а ділянка Дніпро – Вінниця була переведена на номінальну напругу 750 кВ. Ділянка Вінниця – Захід з підстанцією 750 кВ Західноукраїнська у Львівській області була введена в роботу у 1975 році. Довжина лінії 363 км. [17]

Для будівництва ЛЕП в болотистій і лісовій місцевості за робочими кресленнями другого випуску виготовляють V-подібні проміжні опори ПН750-1, які виконані у вигляді трикутної рами з двох сходячих внизу стійок, що спираються на один шарнір фундаменту, і траверси вгорі. Перераховані опорні конструкції з відтяжками займають значну площу, що в більшості випадків унеможливорює їх застосування в умовах міської забудови з високою щільністю інженерних комунікацій. Для обмежених умов, а також затоплених ділянок, трас ПЛ виготовляють вільностоячі опори ПС750-1, ПС750-3 і відповідні підвищують підставки для опор для збільшення міжопорного прольота.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			16

Перераховані проміжні опори розраховані для будівництва ПЛ 750кВ в регіонах з різними ожеледно-вітровими навантаженнями. Високий економічний ефект впровадження опор на відтягненнях визначив їх широке поширення, і зробив основним видом проміжних опор даного класу напруги.

Вільностоячі порталні опори ПЛ 750 кВ через великі габарити і більшої маси опори менш кращі. Незважаючи на це, повністю відмовитися від випуску вільностоячих проміжних опор не вдається. Вони залишаються незамінними при проходженні заплав річок і боліт, будівництві в насиченою підземними та надземними інженерними комунікаціями населеній місцевості, і в інших умовах обмеженого простору.[18]

Параметри ПЛ Віниця-Західноукраїнська

- Номінальна напруга:  $U_{ном} = 750 \text{ кВ}$  ;
- Довжина ЛЕП:  $L = 363 \text{ км}$  ;
- Крок розчеплення фази:  $a = 600 \text{ мм}$  ;
- Відстань між проводами при горизонтальному розміщенні:  $D=19.5 \text{ м}$
- Марка проводу: АС-400/93

Розрахункові дані проводу і опори

- Питомий активний опір проводу:  $r_0 = 0,0178 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$
- Діаметр проводу:  $d = 29,1 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$
- Кількість проводів в розчепленій фазі:  $n_p = 4$
- Крок розчеплення фази:  $a = 600 \text{ мм}$

Середньгеометрична відстань між проводами фаз:

$$D_{cp} = D \cdot \sqrt[3]{2} = 19,5 \cdot \sqrt[3]{2} = 24,57 \text{ м}$$

Еквівалентний радіус проводу розщепленої фази визначається за виразом:

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			17

$$r_{екв} = n_p \sqrt{\frac{d}{2} \cdot \left( \frac{a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n_p}\right)} \right)^{n_p-1}} \cdot n_p = 258.2 \text{ мм}$$

Питомі середньорічні втрати потужності на корону становлять:

$$\Delta P_{\kappa} = 18.3 \frac{\text{кВт}}{\text{км}}$$

Сумарні річні втрати електроенергії в лінії електропередачі надвисокої напруги становлять:

$$\Delta A = 8760 \cdot \Delta P_{\kappa} \cdot L = 58191804 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$$

## 2.1 Розрахунок параметрів еквівалентної фази

ЛЕП є електротехнічним об'єктом з параметрами, рівномірно розподіленими уздовж її довжини. Схема заміщення ділянки лінії в системі координат симетричних складових являє собою однолінійну схему заміщення з поздовжнім активним та індуктивним опорами і поперечними активною і ємнісною провідностями для кожної із симетричних складових.

- *питомий активний опір еквівалентної фази.*

Активним опором лінії називають опар проводів лінії, обумовлений втратами потужності на нагрівання проводів під час протікання по лінії навантажувального змінного струму. У більшості практичних розрахунків при моделюванні лінії електропередачі надвисокої напруги умовно вважають, що погонній активний опір проводу дорівнює омичному постійному струмі за температури +20° С

$$Re_0 := \frac{r_0}{n_p} = \frac{0.018}{4} = 0.004 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

- *питомий реактивний опір еквівалентної фази.*

Індуктивний опір лінії визначається явищами само- і взаємоіндукції у фазних проводах. Величина індуктивного опору істотно залежить від взаємного розташування фазних проводів у просторі, їхнього положення щодо землі і

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			18

грозозахисних тросів, впливу паралельних ланцюгів (для багатоланцюгових ліній електропередачі) і паралельних ліній електропередачі при їхньому зближенні.

$$X_{e0} = \left( 0.144 \cdot \log \left( \frac{D_{сг} \cdot 10^3}{r_{ekv}} \right) + \frac{0.016}{n_p} \right) = 0.144 \cdot \log \left( \frac{24.57 \cdot 10^3}{258.2} \right) + \frac{0.016}{4} = 0.289 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

- *питома активна провідність еквівалентної фази.*

Поперечна активна провідність лінії визначається тратами потужності на корону і наявністю активних струмів страт через лінійну ізоляцію. Останнім, через їхні незначні величини, у практичних розрахунках зазвичай нехтують.

$$G_{e0} = \frac{\Delta P_k \cdot 10^{-3}}{U_{НОМ}^2} = \frac{18.3 \cdot 10^{-3}}{750^2} = 3.253 \times 10^{-8} \frac{\text{См}}{\text{км}}$$

- *питома реактивна провідність еквівалентної фази.*

Поперечна ємнісна провідність лінії визначається взаємними частковими ємностями між проводами окремих фаз, фазами і землею, грозозахисними тросами і конструктивними металевими елементами опори повітряної лінії. Цей параметр лінії так само, як і індуктивний опір, залежить від взаємного розташування фазних проводів лінії відносно один одного, відносно землі та грозозахисних тросів.

$$B_{e0} = \left( \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\log \left( \frac{D_{сг} \cdot 10^3}{r_{ekv}} \right)} \right) = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\log \left( \frac{24.57 \cdot 10^3}{258.2} \right)} = 3.831 \times 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}$$

Параметрів схеми заміщення електропередачі із зосередженими параметрами дорівнюють:

$$Z_{ПЛ} = L \cdot (R_{e0} + i \cdot X_{e0}) = 363 \cdot (0.004 + i \cdot 0.289) = 1.597 + 104.907i \quad \text{Ом}$$

$$Y_{ПЛ} = L \cdot (G_{e0} + i \cdot B_{e0}) = 363 \cdot (3.3 \times 10^{-8} + i \cdot 3.8 \times 10^{-6}) = 1.2 \times 10^{-5} + 1.4i \times 10^{-3} \quad \text{См}$$

Визначимо позірні параметрів схеми заміщення електропередачі за допомогою поправкових коефіцієнтів Шварцкопфа.

Коефіцієнти Шварцкопфа:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
					ДПп7110.141.010	ПЗ			Лист 19

$$k_r = 1 - \frac{L^2}{6} \left[ 2 \cdot X_{e0} \cdot B_{e0} + G_{e0} \cdot R_{e0} \cdot \left( \frac{X_{e0}^2}{R_{e0}^2} - 1 \right) \right] =$$

$$= 1 - \frac{363^2}{6} \left[ 2 \cdot 0.289 \cdot 3.831 \times 10^{-6} + 3.253 \times 10^{-8} \cdot 4.4 \times 10^{-3} \cdot \left[ \frac{0.289^2}{(4.4 \times 10^{-3})^2} - 1 \right] \right] = 0.938$$

$$k_x = 1 - \frac{L^2}{6} \left[ X_{e0} \cdot B_{e0} - G_{e0} \cdot R_{e0} \cdot \left( \frac{R_{e0} \cdot B_{e0}}{G_{e0} \cdot X_{e0}} + 2 \right) \right]$$

$$= 1 - \frac{363^2}{6} \left[ 0.289 \cdot 3.831 \times 10^{-6} - 3.253 \times 10^{-8} \cdot 4.4 \times 10^{-3} \cdot \left( \frac{4.4 \times 10^{-3} \cdot 3.831 \times 10^{-6}}{3.253 \times 10^{-8} \cdot 0.289} + 2 \right) \right] = 0.976$$

$$k_g = 1 + \frac{L^2}{12} \left[ 2 \cdot X_{e0} \cdot B_{e0} + G_{e0} \cdot R_{e0} \cdot \left( \frac{B_{e0}^2}{G_{e0}^2} - 1 \right) \right]$$

$$= 1 + \frac{363^2}{12} \left[ 2 \cdot 0.289 \cdot 3.831 \times 10^{-6} + 3.253 \times 10^{-8} \cdot 4.4 \times 10^{-3} \cdot \left[ \frac{(3.831 \times 10^{-6})^2}{(3.253 \times 10^{-8})^2} - 1 \right] \right] = 1.046$$

$$k_b = 1 + \frac{L^2}{12} \left[ X_{e0} \cdot B_{e0} - G_{e0} \cdot R_{e0} \cdot \left( \frac{G_{e0} \cdot X_{e0}}{R_{e0} \cdot B_{e0}} + 2 \right) \right] =$$

$$= 1 + \frac{363^2}{12} \left[ 0.289 \cdot 3.831 \times 10^{-6} - 3.253 \times 10^{-8} \cdot 4.4 \times 10^{-3} \cdot \left( \frac{3.253 \times 10^{-8} \cdot 0.289}{4.4 \times 10^{-3} \cdot 3.831 \times 10^{-6}} + 2 \right) \right] = 1.012$$

Позірні параметри схеми заміщення лінії становлять:

$$R_{л} = R_{e0} \cdot k_r \cdot L = 0.004 \cdot 0.938 \cdot 363 = 1.498$$

$$X_{л} = X_{e0} \cdot k_x \cdot L = 0.289 \cdot 0.976 \cdot 363 = 102$$

$$G_{л} = G_{e0} \cdot k_g \cdot L = 3.253 \times 10^{-8} \cdot 1.046 \cdot 363 = 1.235 \times 10^{-5}$$

$$B_{л} = B_{e0} \cdot k_b \cdot L = 3.831 \times 10^{-6} \cdot 1.012 \cdot 363 = 1.408 \times 10^{-3}$$

Позірний повний опір і провідність:

$$Z_{ПЛ} = R_{л} + i \cdot X_{л} = 1.498 + i \cdot 102 \text{ Ом}$$

$$Y_{ПЛ} = G_{л} + i \cdot B_{л} = 1.235 \times 10^{-5} + i \cdot 1.408 \times 10^{-3} \text{ См}$$

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			20

## 2.2. Визначення параметрів схем заміщення елементів електропередачі

Дальні електропередачі характеризуються довжинами, які можна порівняти з довжиною електромагнітної хвилі передачі електричної енергії по лінії. Ця обставина визначає необхідність урахування фізики хвильових процесів в задачах моделювання режимів роботи лінії. Такі процеси проявляються у відставанні в часі векторів напруги і струму по фазі наприкінці лінії порівняно із значеннями на початку лінії внаслідок обмеженості швидкості поширення електромагнітної хвилі.

Характер хвильових процесів у дальніх електропередачах визначають хвильові параметри лінії. До останніх належать хвильовий опір і характеристика поширення електромагнітної хвилі.

### Визначення параметрів лінії електропередачі

Хвильові параметри лінії:

Хвильовий опір лінії:

$$Z_{xв} = \sqrt{\frac{Z_{ПЛ}}{Y_{ПЛ}}} = \sqrt{\frac{1.498 + i \cdot 102}{1.235 \times 10^{-5} + i \cdot 1.408 \times 10^{-3}}} = 269.193 - 0.795i \text{ Ом}$$

Коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі:

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{Z_{ПЛ} \cdot Y_{ПЛ}}{L^2}} = \sqrt{\frac{(1.5 + i \cdot 102) \cdot (1.2 \times 10^{-5} + i \cdot 1.4 \times 10^{-3})}{363^2}} = 1.2 \times 10^{-5} + i \times 10^{-3} \frac{1}{\text{км}}$$

Дійсна складова, характеризує зміну модуля вектора напруги (струму) на одиницю довжини:  $\beta_0 = \text{Re}(\gamma_0) = 12.245 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{км}}$

Уявна складова, характеризує зміну фази вектора напруги (струму) на одиницю довжини:  $\alpha_0 = \text{Im}(\gamma_0) = 0,001 \frac{\text{рад}}{\text{км}}$

У теорії передачі електричної енергії дальніми лініями особливий інтерес представляє режим роботи останніх за відсутності відбитої хвилі напруги (струму). Такий режим характеризується передачею по лінії натуральної потужності:

$$P_{нт} = \frac{U_{ном}^2}{R_{xв}} = 2089.576 \text{ МВт}$$

## Визначення параметрів чотириполюсників для повітряної лінії

При вирішенні завдань дослідження характеристик далекої електропередачі надвисокої напруги їх зручно представляти у вигляді пасивного 4-полюсника. Такий підхід дозволяє опустити докладний опис складної схеми електропередачі, представляючи її у вигляді «чорного ящика», тобто фіксуючи лише співвідношення між режимними параметрами на початку й кінці розглянутої лінії. У завданнях моделювання далекої передачі поширення одержали ланцюгові рівняння, записані в загальному виді за допомогою універсальних узагальнених постійних  $A, B, C, D$ .

- для ПЛ:

$$A_{\text{ділПЛ}} = \cosh(\gamma_0 \cdot L) = \cosh\left[\left(1.22 \times 10^{-5} + 1.04i \times 10^{-3}\right) \cdot 363\right] = 0.93 + 1.64i \times 10^{-3}$$

$$B_{\text{ділПЛ}} = Z_{\text{ХВ}} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot L) = (269.193 - 0.795i) \cdot \sinh\left[\left(1.225 \times 10^{-5} + 1.044i \times 10^{-3}\right) \cdot 363\right] \\ = 1.406 + 99.578i$$

$$C_{\text{ділПЛ}} = \frac{1}{Z_{\text{ХВ}}} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot L) = \frac{1}{269.19 - 0.8i} \cdot \sinh\left[\left(1.22 \times 10^{-5} + 1.04i \times 10^{-3}\right) \cdot 363\right]$$

$$D_{\text{ділПЛ}} = \cosh(\gamma_0 \cdot L) = \cosh[(0 + 0.001i) \cdot 363] = 0.929 + 0.00 \text{СМ} \\ = 1.128 \times 10^{-5} + 1.374i \times 10^{-3}$$

$$\text{Перевірка: } A_{\text{ділПЛ}} \cdot D_{\text{ділПЛ}} - B_{\text{ділПЛ}} \cdot C_{\text{ділПЛ}} = 1$$

### 2.3. Параметри реакторів напругою 750 кВ

Як відомо, лінії електропередачі надвисокої напруги характеризуються колосальними ємнісними зарядними потужностями, пропорційними квадрату напруги лінії. Такі зарядні потужності порівняні з натуральною потужністю лінії і суттєво впливають на режим напруги в електропередачі.

Значні обсяги зарядних потужностей можуть приводити до неприпустимого підвищення напруги уздовж самої лінії, особливо, за умови однобічного ввімкнення дальньої електропередачі в режимі синхронізації. Тому обов'язково слід передбачати заходи щодо встановлення поперечних шунтувальних реакторів,

									Лист
									22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		ДПп7110.141.010		ПЗ	

які є радикальним засобом зниження перетоків реактивної потужності по лінії і пов'язаних з ними втрат енергії в режимах малих навантажень.

Для напруги 750кВ використовуємо реактор однофазний масляний **РОДЦ - 110000/750.**

- Номінальна потужність однофазного реактора:  $Q_p = 110 \text{ МВАр}$
- Номінальна напруга реактора:  $U_p = \frac{787}{\sqrt{3}} = 454,375 \text{ кВ}$
- Втрати холостого ходу (в одному реакторі):  $\Delta P_{p\_xx} = 350 \text{ кВт}$

### Параметри трифазної групи реакторів

- Номінальна потужність групи реакторів:  $Q_{pg} = 3 \cdot Q_p = 330 \text{ МВАр}$
- Втрати холостого ходу:  $\Delta P_{pg\_xx} = 3 \cdot \Delta P_{p\_xx} = 1050 \text{ кВт}$
- Активна провідність:  $G_{pg} = \frac{\Delta P_{pg\_xx} \cdot 10^{-3}}{(\sqrt{3} \cdot U_p)^2} = \frac{1050 \cdot 10^{-3}}{(\sqrt{3} \cdot 454,375)^2} = 1,695 \cdot 10^{-6} \text{ См}$
- Реактивна провідність:

$$B_{pg} = -\frac{Q_{pg}}{(\sqrt{3} \cdot U_p)^2} = \frac{330}{(\sqrt{3} \cdot 454,375)^2} = -5,328 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

- Провідність реакторної групи:

$$Y_{pg} = G_{pg} + jB_{pg} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j532,8 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

Визначення кількості реакторних груп:

– мінімальна:

$$N_{\text{min}_{p.g}} = 0.6 \cdot \frac{\text{Im}(Y_{\text{ПЛ}}) \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{pg}} = 0.6 \cdot \frac{\text{Im}(1.235 \times 10^{-5} + i \cdot 1.408 \times 10^{-3}) \cdot 750^2}{330} = 1.44$$

– максимальна:

$$N_{\text{max}_{p.g}} = 0.8 \cdot \frac{\text{Im}(Y_{\text{ПЛ}}) \cdot U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{pg}} = 0.8 \cdot \frac{\text{Im}(1.235 \times 10^{-5} + i \cdot 1.408 \times 10^{-3}) \cdot 750^2}{330} = 1.92$$

Визначення параметрів чотириполюсника для реакторної групи:

$$A_{pg} = 1$$

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			23

$$B_{pg} = 0$$

$$C_{pg} = Y_{pg} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j532,8 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$D_{pg} = 1$$

$$\text{Перевірка: } A_{pg} \cdot D_{pg} - C_{pg} \cdot B_{pg} = 1 \cdot 1 - (1,695 \cdot 10^{-6} - j532,8 \cdot 10^{-6}) \cdot 0 = 1$$

#### 2.4. Дослідження ДЕП в різних режимах її роботи

Остаточне рішення про прийнятий варіант спорудження лінії електропередачі здійснюється на підставі даних розрахунків робочих режимів проектованої лінії електропередачі, що ілюструють дотримання технологічних вимог, що висуваються до неї в процесі експлуатації. Метою таких розрахунків є визначення режиму напруги у вузлових і проміжних пунктах лінії, визначення втрат потужності в ній.

З цією метою розглядають наступні основні режими роботи лінії:

1. *Режим синхронізації.* Являє собою режим роботи лінії електропередачі із заданим рівнем напруги на одному кінці при розімкнутому іншому її кінці. Метою розрахунку є уточнення необхідної кількості шунтувальних реакторів і визначення місць їхнього розміщення вздовж траси лінії для виконання умов неприпустимості виникнення перенапруги у вузлових і проміжних точках електропередачі.

2. *Режим холостого ходу* - режим роботи лінії електропередачі при заданих рівнях напруг по її кінцях, без передачі по лінії активної потужності. Метою розрахунку є остаточне уточнення необхідної кількості й місць розміщення шунтувальних реакторів.

3. *Режим максимальних навантажень.* Є режимом роботи лінії електропередачі при заданих рівнях напруг по її кінцях і передачі по ній проектної робочої потужності. Метою розрахунку є здійснення контролю допустимості режимів реактивної потужності в пунктах примикання електропередачі до поєднаних енергосистем і визначення складу комутованих та некомутованих шунтувальних реакторів.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			24

У загальному випадку процес розрахунку режиму роботи електропередачі надвисокої напруги можна звести до узагальненого алгоритму, що полягає в послідовному виконанні наступних процедур:

1. Визначення параметрів еквівалентного чотириполюсника, що заміщає електропередачу.

2. Трансформація завдання розрахунку режимних параметрів до умов початку або кінця.

3. Послідовне рішення завдання визначення режимних параметрів за умовами початку або кінця для кожного з елементів передачі залежно від результатів виконання процедури 2 алгоритми. У результаті будуть визначені режимні параметри у всіх вузлових пунктах передачі.

Рішення завдання визначення режимних параметрів електропередачі надвисокої напруги здійснюється з використанням узагальнених постійних чотириполюсників, що заміщають елементи електропередачі. При цьому електропередача представляється у вигляді паралельно й послідовно з'єднаних чотириполюсників, параметри яких уже відомі.

### **Режим синхронізації**

Режим синхронізації лінії електропередачі реалізується в процесі включення лінії в роботу. Така операція здійснюється у два етапи. На початку електропередачу підключають до однієї енергосистеми, а потім її відкритий кінець синхронізують із другою системою. Режимом синхронізації є такий режим, коли один з кінців електропередачі підключений до енергосистеми, а іншої залишається розімкнутим у процесі синхронізації із другою енергосистемою.

Відкритий кінець лінії електропередачі може бути підключений до відповідних шин енергосистеми тільки в тому випадку, коли напруга на відкритому кінці лінії й на шинах будуть збігатися як по модулі, так і по фазі. Зміна режиму напруги не спричиняє зниження навантаження генераторів, якщо воно не виходить за межі (5% від номінальної напруги).

Тому синхронізація можлива тільки в тому випадку, коли наведена напруга на відкритому кінці передачі не відрізняється від номінального більш ніж на (5%).

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			25

Таким чином, до перерахованих вище технологічних вимог, виконання яких необхідно перевірити в результаті розрахунку режиму синхронізації лінії електропередачі, розглянутий режим доповнюється третьою вимогою, що полягає у відсутності відхилень напруги в пунктах синхронізації, що виходять за межі  $(0,95 \div 1,05) U_H$ .

Наведемо розрахунки для найбільш оптимального варіанту розподілу реакторів, а саме 0-0, для всіх інших варіантів основні параметри наведемо в таблиці 2.1.

Розподіл груп шунтувальних реакторів:

– на передавальній ПС:  $N_I = 1$

– на приймальній ПС:  $N_{II} = 1$

### Параметри ланцюжкової схеми ДЕП

1) Реакторні групи на початку ДЕП:

$$A_1 = A_{p21} = 1$$

$$B_1 = B_{p21} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_1 = C_{p21} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j5,328 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$D_1 = D_{p21} = 1$$

2) Ділянка ПЛ:

$$A_2 = A_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

$$B_2 = B_{\text{ділПЛ}} = 1.406 + 99.578i$$

$$C_2 = C_{\text{ділПЛ}} = 1.128 \times 10^{-5} + 1.374i \times 10^{-3}$$

$$D_2 = D_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

3) Реакторні групи в кінці ДЕП:

$$A_3 = A_{p22} = 1$$

$$B_3 = B_{p22} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_3 = C_{p22} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j5,328 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

$$D_3 = D_{p22} = 1$$

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			26

Параметри еквівалентного чотирьохполюсника ДЕП:

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.982 + 0.001i & 1.406 + 99.578i \\ 0 + 0i & 0.982 + 0.001i \end{pmatrix}$$

Таким чином, узагальнені параметри еквівалентного чотирьохполюсника, який заміщує електропередачу дорівнюють:

$$A_{e \text{ мод}} = |A_e| = 0.982 \qquad \psi_A = \arg(A_e) = 0.062^\circ$$

$$B_{e \text{ мод}} = |B_e| = 99.588 \quad \text{Ом} \qquad \psi_B = \arg(B_e) = 89.191^\circ$$

$$C_{e \text{ мод}} = |C_e| = 0 \quad \text{См} \qquad \psi_C = \arg(C_e) = 87.432^\circ$$

$$D_{e \text{ мод}} = |D_e| = 0.982 \qquad \psi_D = \arg(D_e) = 0.062^\circ$$

Перевірка:

**Умови режиму синхронізації:**

1) Потужність початку ДЕП:

$$P_{II} = 0 \quad \text{МВт}$$

$$Q_{II} = 0 \quad \text{МВАр}$$

2) Напруга синхронізації на шинах передавальної системи:

$$U_I = U_{\text{ном}} = 750 \quad \text{кВ}$$

**Наслідки умов режиму:**

1) Повна потужність в кінці ДЕП:

$$S_{II} = P_{II} + i \cdot Q_{II} = 0$$

2) Струм в кінці ДЕП:

$$I_{II} = 0$$

**Розрахункові параметри режиму:**

– напруга в кінці ДЕП:

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			27

$$U_{II} = \frac{U_I - B_e \cdot I_{II}}{A_e} = 763.645 - 0.827i \quad \text{кВ}$$

– струм на початку ДЕП:

$$I_I = C_e \cdot U_{II} + D_e \cdot I_{II} = 0.012 + 0.272j$$

– повна потужність на початку ДЕП:

$$S_I = I_I \cdot \overline{U_I} = 9.364 + 203.85j$$

В результаті переходу за ланцюжковою схемою від кінця ДЕП до початку мають бути отримані значення струму та напруги на початку ДЕП, які обов'язково мають збігатися зі значеннями, отриманими на підставі еквівалентних параметрів ДЕП.

#### ГРАФІК РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ЗА ВСІМА ПРОМІЖНИМИ ТОЧКАМИ

Функція залежності напруги ПЛ від довжини має вид:

$$U_{\text{синхр}}(x) = \left| \cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_1 - Z_{xв} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_1 \right|$$

У таблиці 2.1 та на рисунку 2.1. наведений розподіл напруги уздовж ділянки лінії.

Таблиця 2.1. – Розподіл напруги уздовж ділянки лінії електропередачі в режимі синхронізації.

$x$ , км	$U_{\text{синхр}}(x)$ , кВ
0	750
36.3	756.307
72.6	761.528
108.9	765.656
145.2	768.685
181.5	770.61
217.8	771.43
254.1	771.142
290.4	769.747
326.7	767.247
363	763.646

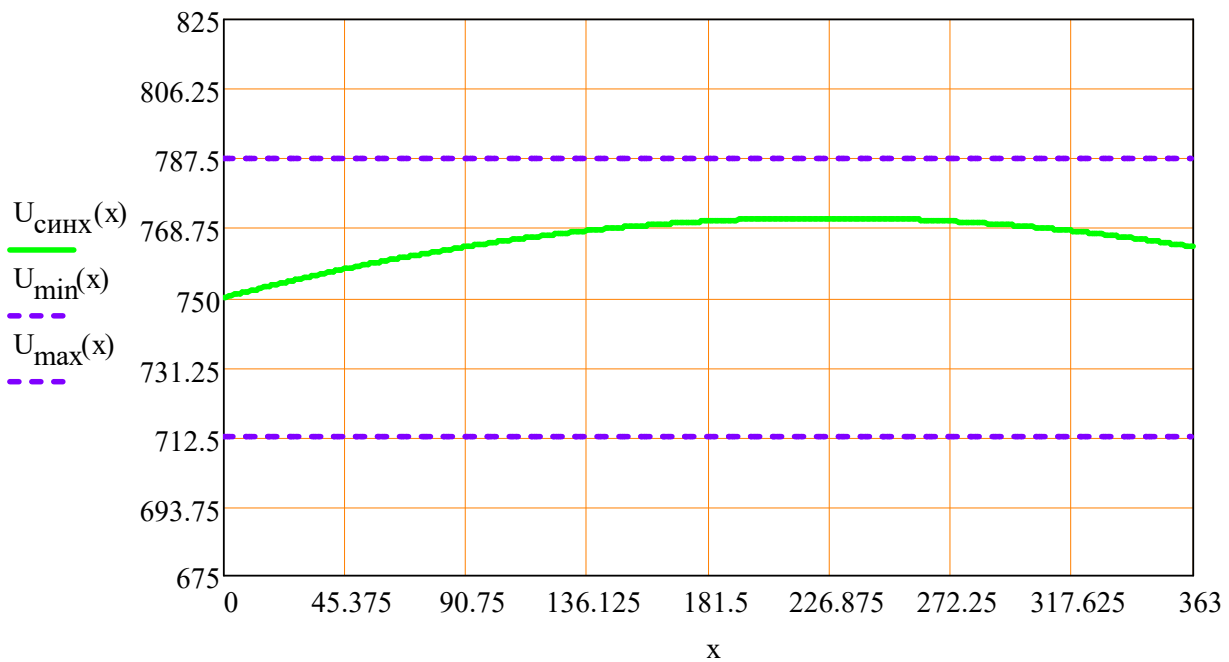


Рисунок 2.1.– Розподіл напруги уздовж ділянки лінії електропередачі в режимі синхронізації

*Втрати активної потужності:  $\Delta P = P_I - P_{II} = 9.364 \text{ MWt}$*

Як видно, у жодному із проміжних пунктів лінії електропередачі неприпустима перенапруга не спостерігається.

### **Режим холостого ходу**

Розрахунок режиму холостого ходу електропередачі буде зводиться до контролю єдиної вимоги неприпустимості виникнення перенапруги у вузлових і проміжних точках передачі. При цьому колосальні обсяги зарядної потужності лінії електропередачі, що стікають у поєднуванні енергосистеми в режимі холостого ходу, будуть приводити до істотного підвищення напруги в проміжних точках передачі. Тому в режимі холостого ходу необхідно максимально понизити рівні напруг на шинах кінцевих підстанцій.

Очевидно, що завдання визначення параметрів режиму холостого ходу електропередачі є частковим випадком завдання, у якій задані рівні напруги по кінцях передачі й активна потужність наприкінці передачі. Очевидно, що в режимі холостого ходу, ця активна потужність дорівнює нулю.

Наведемо розрахунки для найбільш оптимального варіанту розподілу реакторів, а саме 1-1.

Розподіл груп шунтувальних реакторів:

– на передавальній ПС:  $N_I = 1$

– на приймальній ПС:  $N_{II} = 1$

### Параметри ланцюжкової схеми ДЕП

1) Реакторні групи на початку ДЕП:

$$A_1 = A_{p\epsilon 1} = 1$$

$$B_1 = B_{p\epsilon 1} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_1 = C_{p\epsilon 1} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j5,328 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

$$D_1 = D_{p\epsilon 1} = 1$$

2) Ділянка ПЛ:

$$A_2 = A_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

$$B_2 = B_{\text{ділПЛ}} = 1.406 + 99.578i \quad \text{Ом}$$

$$C_2 = C_{\text{ділПЛ}} = 1.128 \times 10^{-5} + 1.374i \times 10^{-3} \quad \text{См}$$

$$D_2 = D_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

3) Реакторні групи в кінці ДЕП:

$$A_3 = A_{z\epsilon 2} = 1$$

$$B_3 = B_{z\epsilon 2} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_3 = C_{z\epsilon 2} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j5,328 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

$$D_3 = D_{z\epsilon 2} = 1$$

Параметри еквівалентного чотириполіусника ДЕП:

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.982 + 0.001i & 1.406 + 99.578i \\ 0 + 0i & 0.982 + 0.001i \end{pmatrix}$$

Таким чином, узагальнені параметри еквівалентного чотирьохполюсника, який заміщує електропередачу дорівнюють:

$$A_{e \text{ мод}} = |A_e| = 0.982 \quad \psi_A = \arg(A_e) = 0.062^\circ$$

$$B_{e \text{ мод}} = |B_e| = 99.588 \quad \text{Ом} \quad \psi_B = \arg(B_e) = 89.191^\circ$$

$$C_{e \text{ мод}} = |C_e| = 0 \quad \text{См} \quad \psi_C = \arg(C_e) = 87.432^\circ$$

$$D_{e \text{ мод}} = |D_e| = 0.982 \quad \psi_D = \arg(D_e) = 0.062^\circ$$

### Умови режиму ХХ:

1) Потужність кінця ДЕП:

$$P_{II} = 0 \text{ МВт}$$

2) Напруги холостого ходу:

$$U_I = U_{\text{НОМ}} = 750$$

$$U_{II} = U_{\text{НОМ}} = 750$$

### Наслідки умов режиму:

1) Реактивна потужність, яку необхідно передати до кінця ДЕП з метою фіксації  $U_{II}$ :

$$Q'_{II} = - \left( \frac{A_{e \text{ мод}} \cdot U_{II}^2}{B_{e \text{ мод}}} \right) \cdot \sin(\psi_A - \psi_B) - \sqrt{\left( \frac{U_I \cdot U_{II}}{B_{e \text{ мод}}} \right)^2 - \left[ P_{II} + \left( \frac{A_{e \text{ мод}} \cdot U_{II}^2}{B_{e \text{ мод}}} \right) \cdot \cos(\psi_A - \psi_B) \right]^2} = -100.942 \text{ МВАр}$$

$$Q''_{II} = - \left( \frac{A_{e \text{ мод}} \cdot U_{II}^2}{B_{e \text{ мод}}} \right) \cdot \sin(\psi_A - \psi_B) + \sqrt{\left( \frac{U_I \cdot U_{II}}{B_{e \text{ мод}}} \right)^2 - \left[ P_{II} + \left( \frac{A_{e \text{ мод}} \cdot U_{II}^2}{B_{e \text{ мод}}} \right) \cdot \cos(\psi_A - \psi_B) \right]^2} = 11194.383 \text{ МВАр}$$

Вибираємо менше за модулем значення:  $Q_{II} = Q'_{II} = -100.942 \text{ МВАр}$ .

2) Повна потужність в кінці ДЕП:

$$S_{II} = P_{II} + i \cdot Q_{II} = -100.942j \quad \text{МВА}$$

3) Струм в кінці ДЕП:

									Лист
									31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					





### Параметри ланцюжкової схеми ДЕП

1) Реакторні групи на початку ДЕП:

$$A_1 = A_{p21} = 1$$

$$B_1 = B_{p21} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_1 = C_{p21} = 1,695 \cdot 10^{-6} - j5,328 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

$$D_1 = D_{AT1} = 1 + j7,386 \cdot 10^{-5}$$

2) Ділянка ПЛ:

$$A_2 = A_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

$$B_2 = B_{\text{ділПЛ}} = 1.406 + 99.578i \quad \text{Ом}$$

$$C_2 = C_{\text{ділПЛ}} = 1.128 \times 10^{-5} + 1.374i \times 10^{-3} \quad \text{См}$$

$$D_2 = D_{\text{ділПЛ}} = 0.929 + 0.002i$$

4) Реакторні групи в кінці ДЕП:

$$A_3 = A_{p22} = 1$$

$$B_3 = B_{p22} = 0 \text{ Ом}$$

$$C_3 = C_{p22} = 0 \text{ См}$$

$$D_3 = D_{p22} = 1$$

Параметри еквівалентного чотирьохполюсника ДЕП:

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.929 + 0.002i & 1.406 + 99.578i \\ 0 + 0.001i & 0.982 + 0.001i \end{pmatrix}$$

Таким чином, узагальнені параметри еквівалентного чотирьохполюсника, який заміщує електропередачу дорівнюють:

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			34

$$A_{e \text{ мод}} = |A_e| = 0.929$$

$$\psi_A = \arg(A_e) = 0.101 \cdot ^\circ$$

$$B_{e \text{ мод}} = |B_e| = 99.588 \quad \text{Ом}$$

$$\psi_B = \arg(B_e) = 89.191 \cdot ^\circ$$

$$C_{e \text{ мод}} = |C_e| = 0.001 \quad \text{См}$$

$$\psi_C = \arg(C_e) = 89.105 \cdot ^\circ$$

$$D_{e \text{ мод}} = |D_e| = 0.982$$

$$\psi_D = \arg(D_e) = 0.062 \cdot ^\circ$$

### Умови режиму максимальних навантажень:

1) Потужність кінця ДЕП:

$$P_{II} = 3000 \text{ МВт}$$

$$Q_{II} = 750 \text{ МВАр}$$

2) Напруги на шинах приймальної і передавальної системи:

$$U_I = U_{ном} = 750 \text{ кВ}$$

$$U_{II} = U_{ном} = 750 \text{ кВ}$$

### Наслідки умов режиму:

1) Повна потужність в кінці ДЕП:

$$S_{II} = P_{II} + i \cdot Q_{II} = 3000 + 750j$$

3) Струм в кінці ДЕП:

$$I_{II} = \frac{S_{II}}{U_{II}} = 4 + j \quad \text{кА}$$

### Розрахункові параметри режиму:

– напруга на початку ДЕП:

$$U_I = A_e \cdot U_{II} + B_e \cdot I_{II} = 602.85 + 400.95j \quad \text{кВ}$$

– струм на початку ДЕП:

$$I_I = C_e \cdot U_{II} + D_e \cdot I_{II} = 3.938 + 1.646i \quad \text{кА}$$

– повна потужність на початку ДЕП:

$$S_I = I_I \cdot \overline{U_I} = 3033.761 - 586.672i \quad \text{МВА}$$

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			35

## ГРАФІК РОЗПОДІЛУ НАПРУГИ ЗА ВСІМА ПРОМІЖНИМИ ТОЧКАМИ

Функція залежності напруги ПЛ від довжини має вид:

$$U_{\max}(x) = \left| \cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_1 - Z_{x\phi} \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_1 \right|$$

У таблиці 2.3. наведений розподіл напруги уздовж ділянки лінії.

Таблиця 2.3. – Розподіл напруги уздовж ділянки лінії електропередачі в режимі максимального навантаження.

$x$ , км	$U_{\max}(x)$ , кВ
0	0
36.3	36.3
72.6	72.6
108.9	108.9
145.2	145.2
181.5	181.5
217.8	217.8
254.1	254.1
290.4	290.4
326.7	326.7
363	363

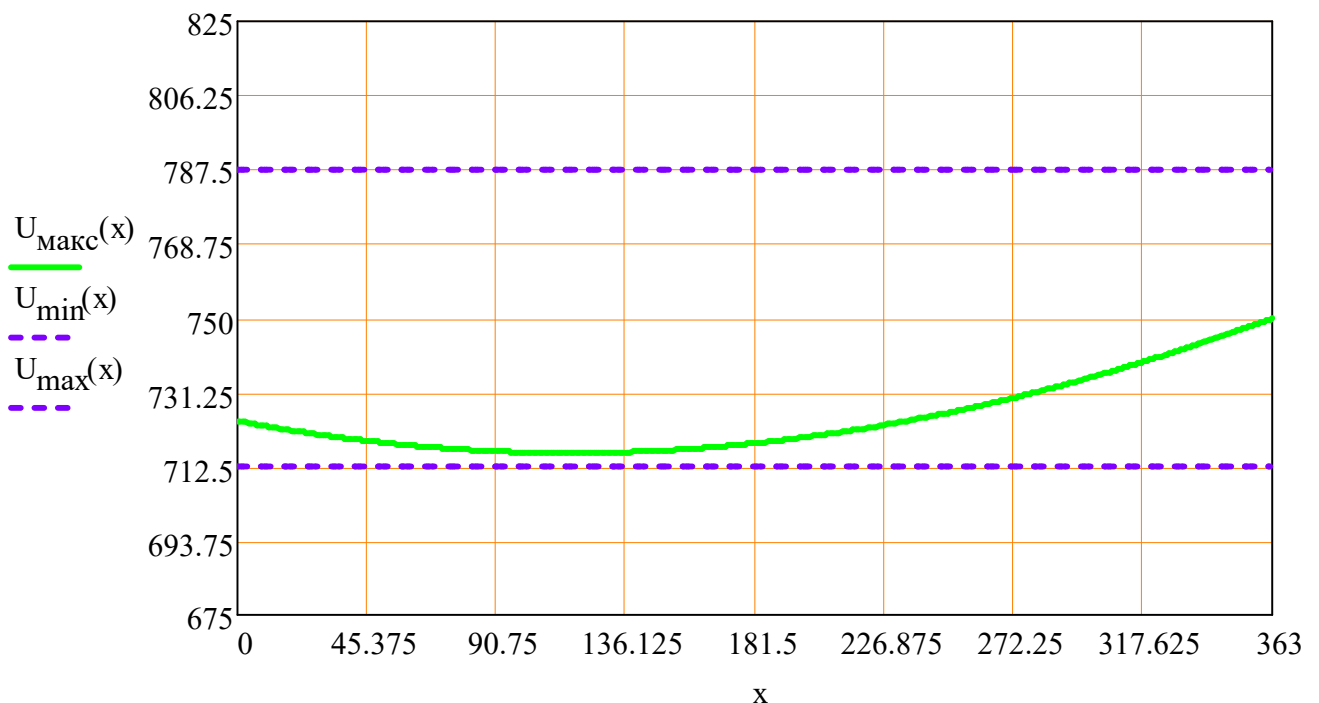


Рисунок 2.3.— Розподіл напруги уздовж ділянки лінії електропередачі в режимі максимальних навантажень

У разі фіксації напруг  $U_1$  і  $U_2$  по кінцях дальньої електропередачі графіки розподілу напруги вздовж довжини лінії набуває вигляду, як показано на рис. 2.3. Із рисунка видно, що якщо активна потужність, що передається по лінії, більша від її натурального значення, спостерігається режим, який призводить до виникнення «ями» напруги в середині лінії  $P > P_{нт}$ .

Як видно із значення втрат реактивної потужності в ДЕП втрати в індуктивних елементах схеми заміщення перевищують зарядну реактивну потужність  $\Delta Q_L > \Delta Q_C$ . Тому спостерігається невеликий провал напруги посередині лінії. Варто мати на увазі, що організувати роботу електропередачі, навантаженої потужністю, більшою від натуральної, можна лише для ліній надвисокої напруги відносно невеликої довжини (до 200–300 км).

*Втрати активної потужності:*

$$\Delta P = P_I - P_{II} = 33.761 \text{ МВт}$$

Як видно, у жодному із проміжних пунктів лінії електропередачі неприпустима перенапруга не спостерігається.

Приведемо в таблиці 6 розраховані параметри для інших варіантів навантаження:

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			37

Таблиця 2.4. – Режимні параметри при різному навантаженні приймальної системи в режимі максимальних навантажень

Потужність, $S_{II}, MVA$	Розподіл реакторних груп	$U_{min}, kV$	$U_{max}, kV$	$U_I, kV$	$U_{II}, kV$	$\Delta P, MW$
3000+j750	1-0	715.965	750	750	750	33.761
3000+j400	1-0	740.288	756.108	750	750	32.524
3000+j100	1-0	749.813	796.69	750	750	35.207
3000+j0	1-0	750	808.109	750	750	31.903
3000-j100	1-0	750	819.585	750	750	31.88
3000-j700	1-0	750	889.493	750	750	32.852
1800+j750	1-0	647.383	750	750	750	18.487
1800+j400	1-0	690.483	750	750	750	17.25
1800+j100	1-0	727.756	750	750	750	16.705
1800-j0	1-0	740.24	750.221	750	750	16.629
1800-j100	1-0	750	755.14	750	750	16.606
1800-j700	1-0	750	828.319	750	750	17.578
950+j750	1-0	611.24	750	750	750	12.027
900+j400	1-0	656.716	750	750	750	10.79
900+j100	1-0	695.801	750	750	750	10.245
900-j0	1-0	708.848	750	750	750	10.169
900-j100	1-0	721.903	750.665	750	750	10.146
900-j700	1-0	750	800.389	750	750	11.117
300+j750	1-0	599.296	750	750	750	10.098
300+j400	1-0	645.614	750	750	750	8.861
300+j100	1-0	685.333	750	750	750	8.316
300-j0	1-0	698.575	750	750	750	8.241
300-j100	1-0	711.819	750.729	750	750	8.217
300-j700	1-0	750	792.166	750	750	9.189

Примітка. Жовтим кольором виділено режими роботи де режим напруги виходить за рамки допустимих меж.

## 2.5. Робочі характеристики лінії «Вінниця – Західноукраїнська»

$$S_{II} = 3000 + j400 \text{ МВА}$$

Робочі характеристики електропередачі являють собою залежності показників роботи електропередачі від величини переданої активної потужності. До таких показників відносяться: активна, реактивна, повна потужності, коефіцієнт потужності на початку й наприкінці передачі, рівні напруги на початку й наприкінці передачі, струм на початку й наприкінці передачі, втрати активної й реактивної потужності, коефіцієнт корисної дії електропередачі.

Перераховані показники режиму роботи передачі визначаються на підставі розрахунків робочих режимів роботи лінії електропередачі, розглянутих раніше.

### Умови режиму:

1) Потужність кінця ДЕП:

$$P_{II} = 3000 \text{ МВт}$$

$$Q_{II} = 400 \text{ МВАр}$$

2) Напруга на шинах передавальної та приймальної систем в режимі максимальних навантажень:

$$U_I = U_{ном} = 762.792 \text{ кВ}$$

$$U_{II} = U_{ном} = 750 \text{ кВ}$$

### Розрахункові параметри режиму:

Крок збільшення активної потужності ДЕП:  $\alpha = 0,1$

1) Активна потужність в кінці ДЕП:  $P_{II}(\alpha) = P_{II} \cdot \alpha$

$$P_{II}(0,5) = 2475 \cdot 0,5 = 1237,5 \text{ МВт}$$

2) Реактивна потужність, яку необхідно передати до кінця ДЕП з метою фіксації  $U_{II} = 750 \text{ кВ}$ :

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			39

$$Q'_{II}(\alpha) = -\left(\frac{|A_e| \cdot U_{II}^2}{|B_e|}\right) \cdot \sin(\psi_A - \psi_B) - \sqrt{\left(\frac{U_I \cdot U_{II}}{|B_e|}\right)^2 - \left[P_{II}(\alpha) + \left(\frac{|A_e| \cdot U_{II}^2}{|B_e|}\right) \cdot \cos(\psi_A - \psi_B)\right]^2}$$

$$Q''_{II}(\alpha) = -\left(\frac{|A_e| \cdot U_{II}^2}{|B_e|}\right) \cdot \sin(\psi_A - \psi_B) + \sqrt{\left(\frac{U_I \cdot U_{II}}{|B_e|}\right)^2 - \left[P_{II}(\alpha) + \left(\frac{|A_e| \cdot U_{II}^2}{|B_e|}\right) \cdot \cos(\psi_A - \psi_B)\right]^2}$$

Вибираємо менше за модулем значення:  $Q_{II}(\alpha) = \min\left[|Q'_{II}(\alpha)|; |Q''_{II}(\alpha)|\right]$

3) Повна потужність в кінці ДЕП:

$$S_{II}(\alpha) = P_{II}(\alpha) + jQ_{II}(\alpha)$$

$$S_{II}(0,5) = P_{II}(0,5) + jQ_{II}(0,5) = 1237,5 - j200,127 \text{ МВА}$$

4) Струм в кінці ДЕП:

$$I_{II}(\alpha) = \frac{S_{II}(\alpha)}{\bar{U}_{II}}$$

5) Напруга та струм на початку ДЕП:

$$U_I(\alpha) = A_e \cdot U_{II} + B_e \cdot I_{II}(\alpha)$$

$$I_I(\alpha) = C_e \cdot U_{II} + D_e \cdot I_{II}(\alpha)$$

6) Потужність на початку ДЕП:  $S_I(\alpha) = \bar{U}_I(\alpha) \cdot I_I(\alpha)$

7) Втрати потужності в ДЕП:

$$\Delta P(\alpha) = P_I(\alpha) - P_{II}(\alpha); \Delta Q(\alpha) = Q_I(\alpha) - Q_{II}(\alpha)$$

8) Коефіцієнти потужності на початку і наприкінці передачі:

$$\cos_I(\alpha) = \frac{P_I(\alpha)}{|S_I(\alpha)|}; \cos_{II}(\alpha) = \frac{P_{II}(\alpha)}{|S_{II}(\alpha)|}$$

9) ККД ДЕП:

$$\eta(\alpha) = \frac{P_{II}(\alpha)}{P_I(\alpha)};$$

Внесемо розрахункові дані при інших значеннях завантаження до таблиці 2.5.

										Лист
										40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Таблиця 2.5. – Результати розрахунків робочих характеристик

Крок, %	$P_{II}$ , МВт	$Q_{II}$ , МВАр	$\cos_{II}(\varphi)$	$\Delta P$ , МВт	$\Delta Q$ , МВАр	$P_I$ , МВт	$Q_I$ , МВАр	$\cos_I(\varphi)$	$\eta$
0	0	0	–	7.99	459.47	7.99	459.47	0.017	0
10	300	40	0.991	8.265	436.313	308.265	476.313	0.543	0.973
20	600	80	0.991	9.023	381.305	609.023	461.305	0.797	0.985
30	900	120	0.991	10.266	294.445	910.266	414.445	0.91	0.989
40	1200	160	0.991	11.993	175.735	1211.993	335.735	0.964	0.99
50	1500	200	0.991	14.205	25.172	1514.205	225.172	0.989	0.991
60	1800	240	0.991	16.9	-157.241	1816.9	82.759	0.999	0.991
70	2100	280	0.991	20.08	-371.506	2120.08	-91.506	0.999	0.991
80	2400	320	0.991	23.744	-617.622	2423.744	-297.622	0.993	0.99
90	2700	360	0.991	27.892	-895.59	2727.892	-535.59	0.981	0.99
100	3000	400	0.991	32.524	-1205.4	3032.524	-805.409	0.966	0.989

Графік робочих характеристик ДЕП:

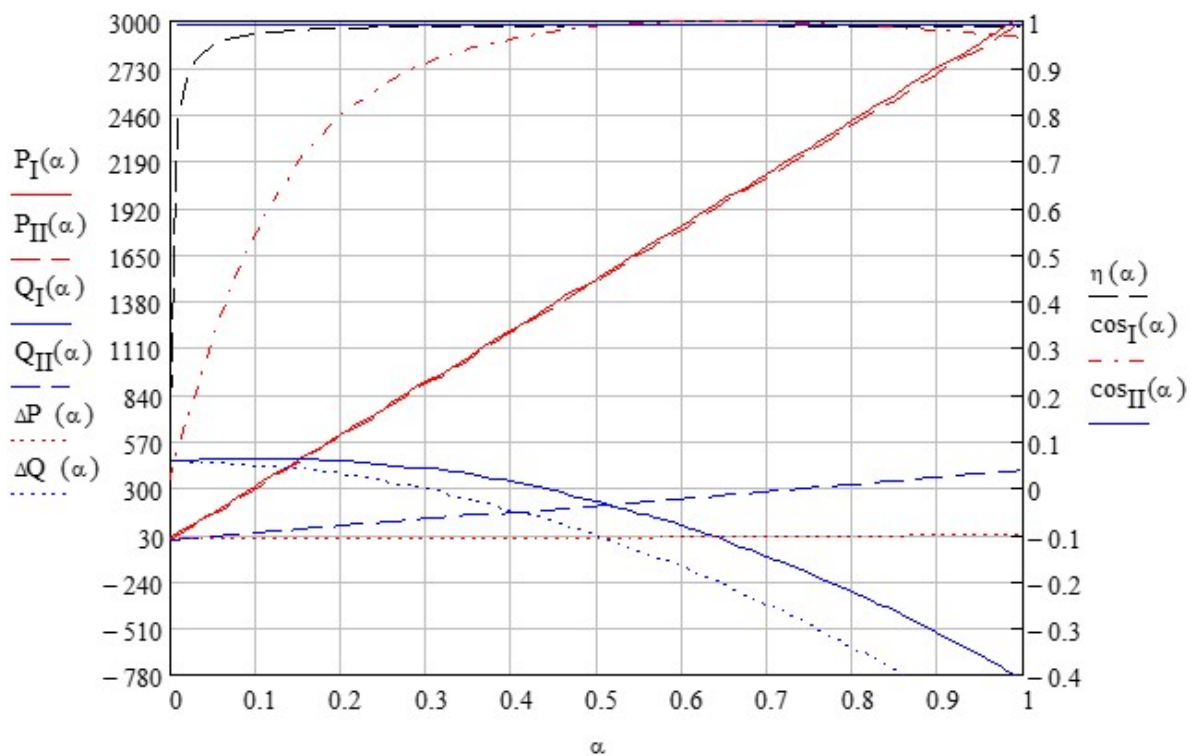


Рисунок 2.4.– Робочі характеристики електропередачі

## Висновок до розділу 2

Аналізуючи отримані результати розрахунків роботи лінії «Вінниця - Західноукраїнська в режимах синхронізації (1-1), холостого ходу (1-1), максимального навантаження (1-0) та розподіл шунтуючих реакторів на лінії, можна зробити наступні висновки:

1) У даних режимах синхронізації та ХХ у жодному із проміжних пунктів лінії електропередачі неприпустима перенапруга не спостерігається. В режимі максимальних навантажень дотримання напруги вздовж усієї лінії у допустимих межах можливе не у всіх розглянутих варіантах. Зі зміною потужності навантаження треба передбачити комутуючий шунтувальний реактор в приймальній системі і в передавальній системі також реактор необхідно вимикати в деяких режимах.

2) У всіх режимах найбільш оптимальним як з економічної точки зору, так і з точки зору мінімальних втрат в ДЕП є режим розподілу реакторів 1-0.

3) Побудовані графіки робочих характеристик відповідають діапазону завантаження ДЕП за активною потужністю кінця, для яких розстановка реакторів відповідає прийнятій для режиму максимальних навантажень розстановці.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			42

### 3. Застосування обмежувачів перенапруги в дальніх лініях електропередач

#### 3.1. Загальні відомості про обмежувачі перенапруги

Одним з найбільш небезпечних аварійних режимів в електричних мережах є імпульсний стрибок напруги при атмосферних розрядах, перетин ліній або комутаційних операціях. Ця величина значно випереджає наростання імпульсного струму і впливає на ізоляцію електрообладнання та інших пристроїв, тому класичні автомати та інші захисти, які реагують на зміну номінального струму, проти неї не ефективні.

Значення перенапруги може в рази перевищувати номінальну робочу величину, тому таке явище наражає на небезпеку все обладнання і елементи мережі. З метою запобігання значних збитків і наступних витрат на відновлення в електроустановках використовуються обмежувачі перенапруги (ОПН). Обмежувач перенапруги нелінійний - електричний апарат, призначений заради захисту обладнання систем електропостачання від комутаційної та грозової перенапруги. ОПН також можна назвати розрядником з відсутнім іскрових проміжків. Застосування ОПН на сьогоднішній день є одним з ефективних засобів захисту обладнання електричних мереж від перенапруги [10].

Захисна дія обмежувача перенапруги обумовлена тим, що при появі небезпечної дії при перенапрузі для ізоляції, внаслідок високої нелінійності його резисторів через обмежувач перенапруги протікає значний імпульсний струм, в результаті чого величина перенапруги знижується до рівня, безпечного для ізоляції обладнання [10].

Основна відмінність матеріалу нелінійних резисторів обмежувачів від матеріалу резисторів вентильних розрядників полягає в різко нелінійній вольтамперній характеристиці (ВАХ) та підвищеній пропускній здатності. Застосування в ОПН високонелінійних резисторів дозволило виключити з конструкції апарату іскрові проміжки, що усуває цілий ряд недоліків (низька

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			43

чутливість і швидкодія, струм що супроводжує КЗ на землю, вибухонебезпеку), властивих вентильним розрядникам [11].

Для виготовлення ОПН застосовується матеріал, де знаходить застосування окис цинку в суміші з оксидами інших металів. Завдяки складу даної суміші, колонка, зібрана з варисторів є комбінацією паралельних і послідовних включень р-п переходів, що й обумовлює природу вольтамперних характеристик нелінійних резисторів обмежувачів.

Коли характеристики напруги в мережі відповідають номінальним значенням, обмежувач знаходиться в режимі непровідного стану. Величина струму в варисторах має мізерні значення і пояснюється ємнісним характером. При появі в мережі імпульсу напруги, величина якого може викликати пробою ізоляції електрообладнання, в ланцюзі нелінійних резисторів ОПН, відповідно до їх вольтамперних характеристик, матиме місце виникнення значного імпульсу струму. В кінцевому підсумку це знижує величину перенапруги до параметрів безпечних для безаварійної експлуатації обладнання. Коли напруга в мережі нормалізується, ОПН знову повертається в непровідний режим. [19].

### **3.2. Класифікація обмежувачів перенапруги**

Обмежувачі перенапруги поділяються на види, відповідно до:

1. типу зовнішньої ізоляції (полімерна, порцелянова, скляна);
2. конструктивного виконання (одноколонкові, багатоколонкові);
3. класу робочої напруги (6-10 кВ; 35кВ; 110кВ; 220кВ та ін.);
4. місця установлення (відкриті або закриті розподільні пристрої) [10].

Розвиток технології і отриманий на практиці досвід привели до створення трьох типів ОПН, що розрізняються по конструкції корпусу:

#### *1.1 ОПН з порцеляною ізоляцією*

Являють собою колонку варисторів, притиснуту до бічної поверхні склопластикової труби, розташованої всередині фарфорової покривки. Набули великого поширення серед захисних засобів, але останнім часом мало користуються попитом у зв'язку з появою ОПН з полімерною покривкою.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			44

Переваги:

- 1) Відносно малий вплив зовнішніх температурних коливань на стан апарату;
- 2) велика механічна стійкість (це пов'язано з тим, що основна механічне навантаження прикладається до ізоляційної покриття).

Недоліки:

- 1) Недостатнє забезпечення герметичності вузла кріплення фланця до порцелянової ізоляційної покриття і збереження властивостей гумових ущільнювачів в процесі тривалої експлуатації;
- 2) Висока вибухонебезпечність (порцелянові уламки під час вибуху розлітаються в різні боки з величезною швидкістю);
- 3) Маса і габарити (обмежувачі в полімерній покритті в 2-3 рази легші, ніж ОПН з порцелянової ізоляції);
- 4) Гірші порівняно з полімерними ОПН теплові характеристики [12].

### *1.2 ОПН з полімерною ізоляцією*

ОПН складається з колонки варисторів, укладених в високоміцний полімерний корпус з високомолекулярного каучуку, нанесеного на склопластиковий циліндр. Простір між склопластиковим циліндром і колонкою резисторів заповнюється низькомолекулярним каучуком, а сама склопластикова труба має розрахункову кількість отворів для забезпечення вибухобезпеки конструкції при проходженні струмів короткого замикання. На даний момент ОПН з полімерною ізоляцією (ОПНп) перевершили за масштабами використання та виробництва порцелянові ОПН [10].

Переваги:

- 1) висока гідрофобність;
- 2) значно вища вибухобезпечність, ніж порцелянових ОПН;
- 3) мала вага;
- 4) кращі ніж у ОПН з порцеляновою покриття електричні і розрядні характеристики;
- 5) простота монтажу і транспортування, а також стійкість до ударних і вібраційних дій;

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			45

б) здатність працювати в умовах природних і промислових забруднень і ін.

Недоліки:

1) вплив сезонних коливань температури навколишнього середовища (внутрішній простір має коефіцієнт теплового розширення, який значно відрізняється від матеріалу покриття, що може призвести до деформації ребер покриття і зниження електричної міцності зовнішньої ізоляції);

2) неправильний розрахунок механічного навантаження може призвести до розтріскування варисторів обмежувача [12].

### *2.1. Одноколонкові ОПН*

Конструктивно складаються з однієї колонки варисторів. Вони випускаються з довжиною шляху витоку зовнішньої ізоляції, яка відповідає ступеням забруднення II, III, IV. Існують одноколонкові ОПН на всі класи напруги, при цьому максимально використовується обсяг корпусу апарату, що також значно знижує масу ОПН в порівнянні з багатоколонковими ОПН і істотно підвищує надійність роботи [10].

### *2.2. Багатоколонкові ОПН*

Являють собою кілька блоків (модулів), які утворюються з певної кількості колонок, з'єднаних або послідовно, або паралельно між собою. ОПН складають з двох або трьох частин (модулів). Така конструкція істотно підвищує надійність роботи ОПН при зволоженні і забрудненні поверхні апарату [12].

## **3.3. Конструкція обмежувачів перенапруги**

Первинним і основним елементом, з чого складається обмежувач перенапруги, служить варистор. Конструктивно ОПН складаються з варисторів, розміщених в корпусі. В даний час варистори для обмежувачів виготовляються як циліндричні диски (рис. 3.1). На торцевій частині дисків методом металізації наносяться алюмінієві електроди. Бічні поверхні диска покривають гліфталевою емаллю, що підвищує пропускну здатність при імпульсах струму з крутим фронтом. Діаметр варистора визначає пропускну здатність варистора за струмом, а його висота – параметри за напругою. Під час виготовлення ОПН певну кількість

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			46

варисторів з'єднують послідовно в, так звану, колонку. Залежно від необхідних характеристик ОПН і його конструкції обмежувач може складатися з однієї колонки або з ряду колонок, з'єднаних між собою послідовно та (або) паралельно.

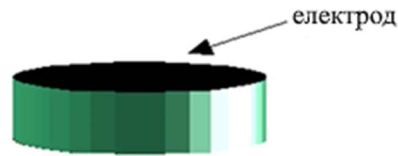


Рис. 3.1. – Нелінійний резистор – варистор

Основні конструктивні частини ОПН – нелінійні елементи (варистори), зовнішня ізоляція, верхній і нижній фланці – представлені на рис.2, а.

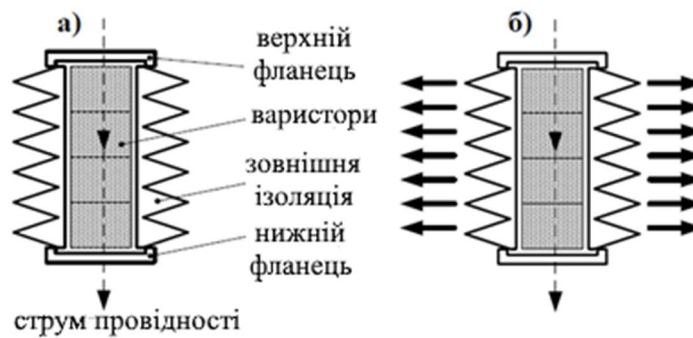


Рис.3.2. Основні частини конструкції ОПН і принцип його роботи.

Принцип роботи ОПН побудований на різко нелінійній вольтамперній характеристиці варисторів, тобто нелінійній залежності струму від напруги. В нормальному режимі при впливі на ОПН фазної робочої напруги мережі в варисторах проходить зневажливо малий струм, величина якого становить доли міліампера. У разі виникнення зовнішньої або внутрішньої перенапруги струм в варисторах різко зростає, а енергія перенапруги у вигляді тепла розсіюється в ОПН та в колі його заземлення. Отже, для успішної безаварійної роботи ОПН необхідно, щоб відведення тепла через його бічну поверхню (рис.3.2, б) був інтенсивніше процесу виділення тепла в варисторах.

Інтервали часу між наступними хвилями грозової або комутаційної перенапруги, як правило, цілком достатні для охолодження ОПН і його переходу в початковий стан, але коли температура варисторів дорівнює або трохи більше температури навколишнього середовища навпаки, квазістаціонарні перенапруги можуть призводити до багаторазових спрацьовувань ОПН протягом малого

інтервалу часу, недостатнього для охолодження варисторів. Саме тому кажуть, що ОПН призначені для захисту ізоляції від грозової та комутаційної перенапруги.

Якщо при виготовленні вентильних розрядників ВР в якості зовнішньої ізоляції використовувалася порцеляна, то ОПН прийшли в енергетику разом з полімерною ізоляцією. На гідності полімерної ізоляції в експлуатації вже неодноразово вказувалося: серед них висока гідрофобність (як наслідок - низька ймовірність перекриття по поверхні ізоляції в зволоженому стані), вибухонебезпечність, захист від вандалізму, мала вага, здатність працювати в умовах природних і промислових забруднень, широкий діапазон робочих температур тощо.

Відсутність в конструкції ОПН іскрових проміжків і використання полімерної ізоляції дозволили максимально спростити і здешевити застосування ОПН.

Великі габарити і вага не давали можливості масово встановлювати ВР на повітряних лініях, тоді як легка і компактна конструкція сучасних ОПН з полімерною ізоляцією зробила їх дуже привабливим для захисту ізоляції повітряної лінії електропередавання (ПЛ). Додатковим поштовхом до «популяризації» технічного рішення по установці ОПН на ПЛ стали наступні, на жаль помилкові, припущення:

- для надійного захисту ізоляції ПЛ досить розмістити уздовж її траси обмежену кількість ОПН, тобто захисна зона ОПН становить багато сотень метрів;

- для надійної роботи ОПН, встановлених на ПЛ, досить застосовувати ОПН, розраховані на менші струми порівняно з ОПН в розподільчих пристроях (РП) підстанцій, тобто ОПН для лінії може бути помітно легше і дешевше аналога для РП.

Незважаючи на те, що для захисту ПЛ необхідну кількість ОПН можна порівняти з кількістю опор лінії, а струмові і енергетичні характеристики підвісних ОПН повинні бути не гірше, ніж у підстанційних апаратів, ОПН вже знаходять і будуть все більше знаходити застосування на повітряних лініях, оскільки в ряді випадків альтернативи їм немає.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			48

### 3.4. Основні технічні характеристики ОПН 750 кВ

Розглянемо технічні характеристики ОПН 750 кВ на прикладі обмежувача ОПНп-750/2100/455/20-II-УХЛ1. (Рис 3)

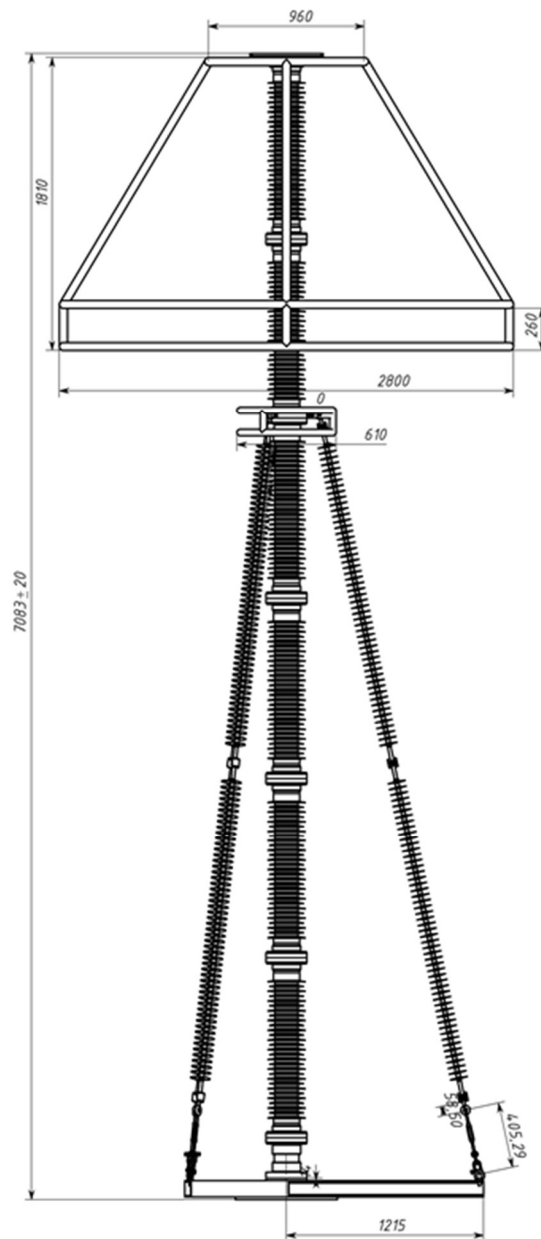


Рис.3.3. – Габаритні розміри ОПН -750 категорії розміщення УХЛ1 (опорна виконання, з ізолюючою основою), мм

При виборі обмежувача перенапруги потрібно звертати увагу на такі технічні характеристики (для ліній 750 кВ):

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			49

1) Максимальна діюча напруга. Під цим поняттям необхідно розуміти величину максимального значення величини напруги, при якій обмежувач здатний зберігати свою працездатність без обмеження за часом (455 кВ).

2) Номінальна напруга, еквівалентна величині, вплив якої ОПН здатний витримувати протягом 10 хвилин. (569 кВ)

3) Струм провідності. Величина струму в колі нелінійних резисторів в період дії номінальних значень прикладеної напруги. Як правило, має мізерне значення.

4) Номінальний розрядний струм. Параметр, що визначає класифікацію обмежувача в умовах грозового режиму. (20 кА)

5) Розрахунковий струм комутаційної перенапруги. Значення струму, що визначає класифікацію при комутаційному перенапруженні.

6) Стумова пропускна здатність. Величина еквівалентна класу розряду лінії. (2100А)

7) Стійкість до короткого замикання. Категорія здатності ОПН протистояти струмам короткого замикання, зберігаючи при цьому цілісність захисної оболонки [13].

Обмежувачі перенапруги нелінійні мають кращі характеристики ніж попередники (іскрові проміжки та вентиляльні розрядники). У зв'язку з їх перевагами спостерігається значне підвищення інтересу виробників та науковців до розробки, виробництва та нових методів застосування ОПН. Класифікація ОПН дуже широка, починаючи з різних матеріалів ізоляційної покривки і закінчуючи місцем встановлення. Комбінуючи різні класифікації, кількість різних видів ОПН та їх застосування стає надзвичайно великою.

### **3.5. Місця установки ОПН уздовж траси повітряної лінії**

Якщо для конкретної ПЛ складно виявити несприятливі з точки зору грозових перекриттів ізоляції ділянки траси, конкретні неблагополучні місця і опори вздовж траси ПЛ, то тоді мова може йти про захист від грозової перенапруги усіх ділянок лінії. В такому випадку слід визначитися з тим, а як часто уздовж траси ПЛ треба

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			50

встановлювати ОПН: на кожній опорі (рис.4, а), через опору (рис.4, б), через дві опори і ін. Інакше кажучи, треба мати уявлення про захисній зоні ОПН.

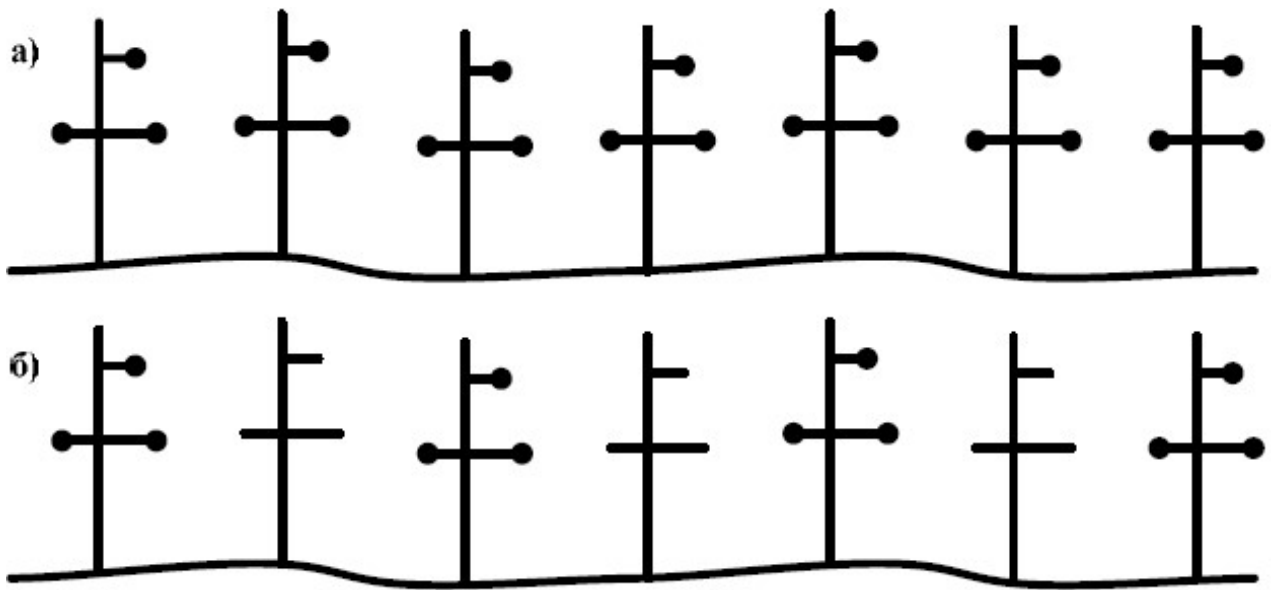


Рис.3.4. – Розміщення ОПН уздовж всієї траси ПЛ: (а) - на кожній опорі, (б) - через опору.

При установці ОПН в розподільчому пристрої не допускають, щоб відстань по ошиновці від ОПН до захищеного силового трансформатора перевищувало кілька десятків метрів [15]. Таким чином, захисна зона ОПН в розподільчому пристрої становить всього лише десятки метрів і тому не слід очікувати, що при установці ОПН на опорі ПЛ він зможе захищати ізоляцію відразу багатьох опор, віддалених від ОПН на сотні метрів. Безумовно, пробій ізоляції трансформатора і перекриття лінійної ізоляції ПЛ - це принципово різні події з точки зору економічного збитку. Крім того, в рамках заданого класу напруги розрядна напруга ізоляції ПЛ приблизно в 1.5 рази вище, ніж допустима напруга для внутрішньої ізоляції обладнання [16]. Проте, захисною зоною ОПН на ПЛ можна вважати лише кілька сотень метрів і ніяк не більше. Тому, кажучи про захист ізоляції ПЛ уздовж всієї її довжини, слід розуміти, що ОПН доведеться ставити не рідше, ніж кожні 200-300 м:

- для ПЛ 6-10 кВ (типовий прогон 60 м) не рідше ніж через 2-3 опори;
- для ПЛ 35-750 кВ на кожній опорі.

Коли мова йде про локальні неблагополучні з точки зору грозової перенапруги ділянки траси ПЛ або конкретні опори, установка ОПН, зрозуміло, доцільна лише на них:

- на опорах, що часто вражаються блискавкою (рис.5, а та б);
- на високих опорах із збільшеною індуктивністю (рис.5, б);
- на опорах із збільшеним опором заземлення (рис.5, в);
- в інших випадках.

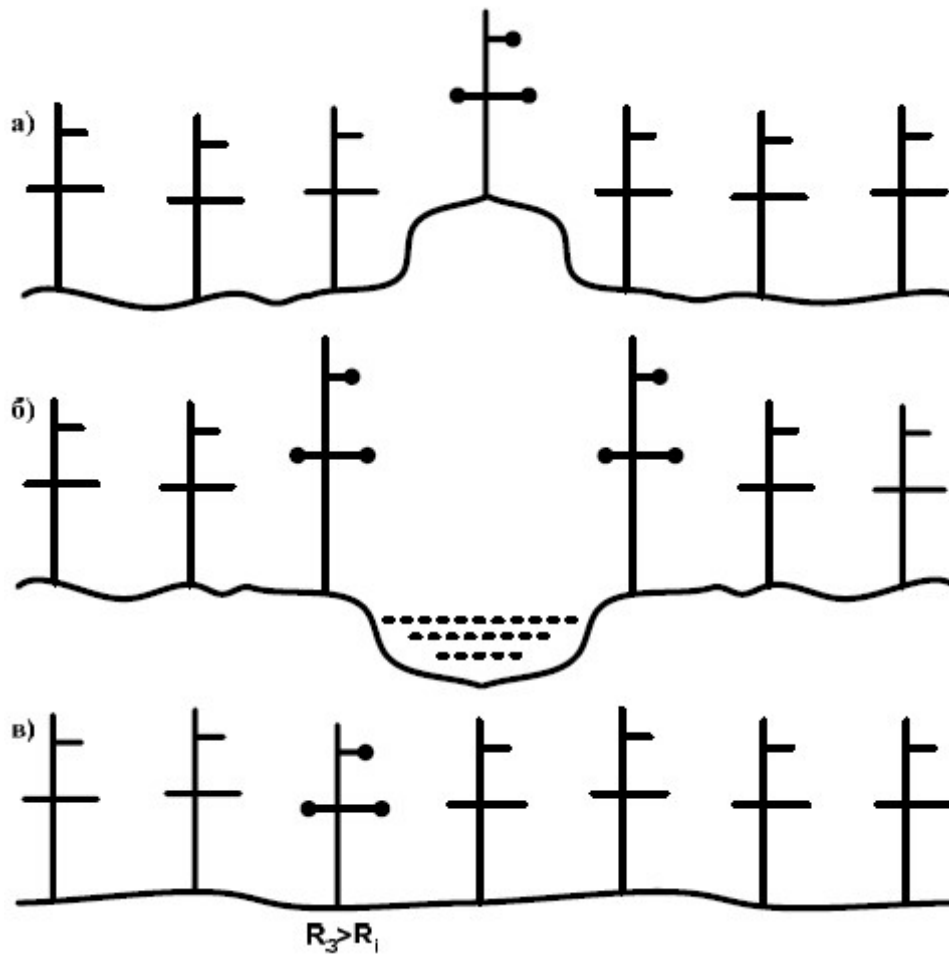


Рис.3.5. – Розміщення ОПН на проблемних опорах: (а) - на опорах, що часто вражаються, (б) - на опорах з підвищеною індуктивністю, (в) - на опорах з підвищеним опором заземлення.

### 3.6. Місця установки ОПН на одноколових опорах

У табл.3.1. – 3.2. наведено різні варіанти розміщення ОПН на одноколовій опорі ПЛ, що відрізняються кількістю необхідних апаратів і ефективністю зниження кількості грозових перекриттів ізоляції лінії.

При розрядах блискавки грозові перенапруги на ізоляції різних фаз можуть бути різні, а першочергова установка ОПН краща в ті фази, ізоляція яких піддається найбільшим впливам. Такі фази послужили основою для формулювання загальних рекомендацій по розміщенню ОПН на одноколових опорах, які наведені в табл.3.1 для розташування проводів в вершинах трикутника і в табл.3.2 для горизонтального розташування проводів.

Табл.3.1. Захист одноланцюгових ПЛ з трикутним розташуванням проводів.

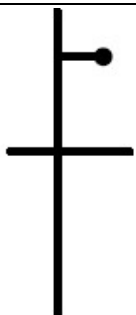
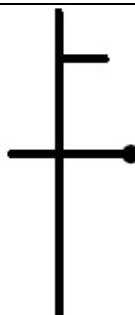
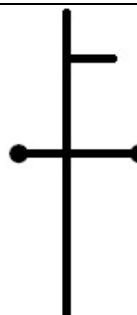
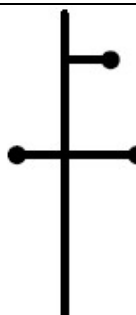
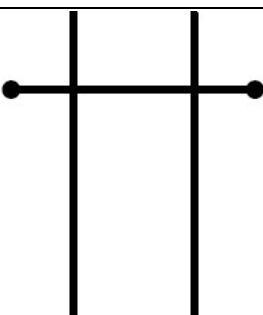
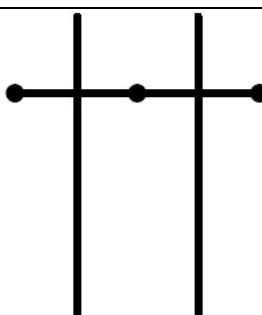
Розташування ОПН на опорі	В верхній фазі	В нижній фазі (під верхній)	В нижніх фазах	У всіх фазах
Схема				
Число ОПН на опорі	1	1	2	3

Табл.3.2. Захист одноланцюгових ПЛ з горизонтальним розміщенням проводів.

Розташування ОПН на опорі	В крайніх фазах	У всіх фазах
Схема		
Число ОПН на опорах	2	3

У кожному конкретному випадку оптимальний варіант захисту ПЛ повинен бути доведений техніко-економічними розрахунками, в яких, зокрема, необхідно визначити, а які з 4-х зазначених в табл.3.3-3.4 розрахункових випадків є основними винуватцями відключень ПЛ.

Для трикутного розташування проводів обґрунтуванням узагальнених рекомендацій табл.3.3 служать наступні положення:

- розряди блискавки в дроти найбільш вірогідні для верхніх фаз і, тому, саме в них виправдана установка ОПН для захисту від перенапруги, викликані прямими розрядами блискавки;

- при розрядах блискавки в опори лінії без троса, незалежно від опору заземлення опор, найбільші перенапруги виникають на верхніх фазах, і саме вони в першу чергу вимагають захисту;

- при розрядах блискавки в троси вказати фази, які перекриваються частіше інших, без проведення розрахунків досить складно, однак відомо, що при малих опорах заземлення частіше перекриваються верхні фази, а при підвищених опорах заземлення - нижні фази;

- індукційним перенапруженням піддається ізоляція всіх трьох фаз одноланцюгової опори, і, отже, при захисті від них установка ОПН потрібно одночасно в усі три фази.

Для горизонтального розташування проводів обґрунтуванням узагальнених рекомендацій табл.3.4 служать наступні положення:

- при наявності тросів розряди блискавки вірогідні в крайні фази, а при відсутності троса - в будь-фази;

- всі три фазних проводи мають однакову висоту підвісу і рівну індуктивність ділянки опори від траверси до землі - тому при розрядах блискавки в опору лінії без троса не представляється можливим вказати фазу, ізоляція якої перекривається частіше за інших;

- при наявності тросів найбільший коефіцієнт зв'язку з тросами має місце для середньої фази (у неї «два троса», а у крайніх тільки «один трос») - тому при розрядах блискавки в трос найбільш часто будуть перекриватися крайні фази.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			54

Табл.3.3. Грозові перенапруги на ізоляції одноланцюгової ПЛ з трикутним розташуванням проводів і рекомендації по місцях першочерговим установки ОПН.[14]

Номер розрахункового випадку	Місце розряду блискавки	Місце першочергової установки ОПН	
		Верхні фази	Нижні фази
1	у фазний провід	+	
2	у опору лінії без троса	+	
3	у трос (зблизька або на віддаленні від опори)	+(малі R)	+(Великі R)
4	Поряд с ПЛ	+	+

Табл.3.4. Грозові перенапруги на ізоляції одноланцюгової ПЛ з горизонтальним розташуванням проводів і рекомендації по місцях першочерговим установки ОПН.[14]

Номер розрахункового випадку	Місце розряду блискавки	Місце першочергової установки ОПН	
		Крайні фази	Середні фази
1	у фазний провід лінії без троса	+	+
	у фазний провід лінії з тросом	+	
2	у опору лінії без троса	+	+
3	у трос (зблизька або на віддаленні від опори)	+	
4	Поряд с ПЛ	+	+

### 3.7. Основні типи ОПН і спосіб їх приєднання до ПЛ

Існує два основних типи ОПН, призначених для захисту ізоляції ПЛ від перенапруги (рис.6) - ОПН без зовнішнього іскрового проміжку і з ним.

ОПН із зовнішнім іскровим проміжком (ОПНІ) не слід плутати з вентильними розрядниками. Дійсно РВ і ОПНІ містять послідовні іскрові проміжки, проте є такі відмінності:

- в конструкції ОПНІ використовується зовнішній іскровий проміжок, а в конструкції РВ - внутрішній;

- в конструкції ОПН і ОПНІ використовуються нелінійні елементи набагато досконаліші, ніж в конструкції РВ.

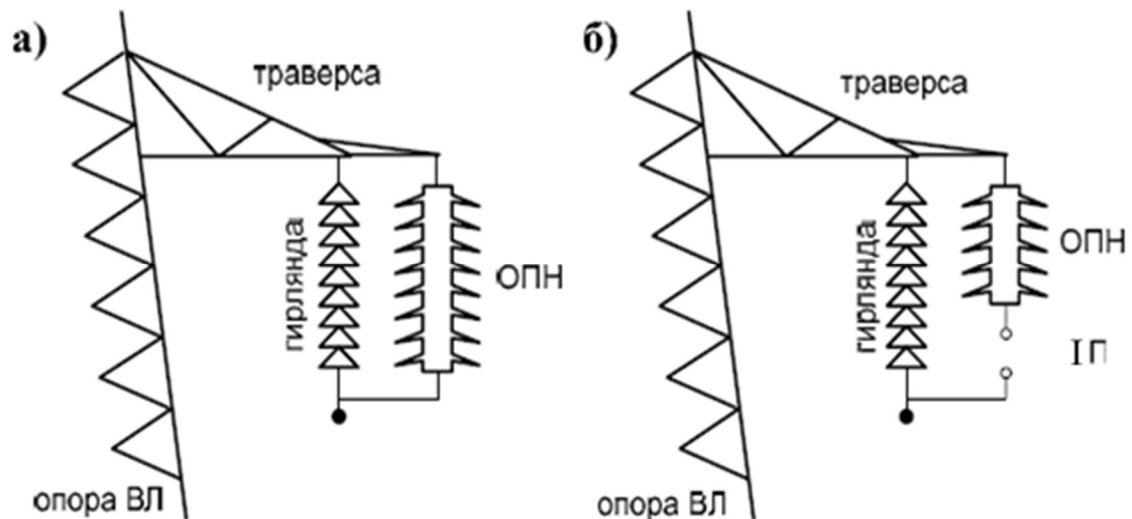


Рис.3.6. – Принципові способи кріплення ОПН до опори: (а) - без іскрового проміжку, (Б) - через зовнішній іскровий проміжок.

У конструкції ОПНІ іскровий проміжок (ІП) налаштовується на спрацьовування при грозових перенапругах, виключаючи вплив на нелінійні елементи нормального робочого напруги мережі, а також квазістаціонарних і комутаційних перенапруг. Перераховані особливості ОПНІ, як це прийнято вважати, є його перевагами, однак, насправді:

- комутаційні перенапруги слід враховувати лише для протяжної повітряної лінії 330-750 кВ і тільки тоді, коли на ній встановлений єдиний комплект ОПН;

- квазістаціонарні перенапруги майже не становлять небезпеки для ОПН при правильному виборі його найбільшої робочої напруги; для підвищення надійності

ОПН на ПЛ допустимо застосовувати ОПН з підвищеною напругою, оскільки ізоляція ПЛ має більшу імпульсну міцність в порівнянні з внутрішньою ізоляцією РП;

- тривалий вплив на ОПН робочої напруги мережі згідно дослідженням призводить до відновлення первісної вольтамперної характеристики ОПН, компенсуючи деградацію властивостей нелінійних елементів, викликану проходженням імпульсних струмів;

- тривалий вплив напруги «підсушує» апарат, знижуючи ризик його зволоження.

Лише для довгих ПЛ 330-750 кВ при одиничній установці ОПН наявність іскрового проміжку є певною перевагою ОПН, тоді як в інших випадках іскровий проміжок - скоріше недолік. Крім того, відсутність іскрового проміжку дозволяє:

- прискорити вступ ОПН в роботу з обмеження перенапруг;
- виключити невірну роботу проміжку внаслідок помилок монтажу;
- розсіювати енергію грозових перенапруг одночасно у великій кількості ОПН, знижуючи навантаження на кожен з них і підвищуючи надійність технічного рішення.

Найважливішим фактором, який слід враховувати при виборі способу приєднання ОПН до опори, є можливість подальшої експлуатації ПЛ в разі пошкодження одного з встановлених ОПН.

ОПНІ, як правило, має жорстке кріплення до опори, необхідне для забезпечення сталості габаритів іскрового проміжку. При виході з ладу ОПН, встановленого через іскровий проміжок, на ПЛ з'являється місце з ослабленою електричною міцністю. Виявлення такого ОПН буває утруднено, оскільки пошкодження ОПН може ніяк не позначитися на його зовнішній вигляд, а це означає, не завжди цей апарат можна виявити візуальним оглядом при обході ПЛ.

Відсутність іскрового проміжку робить можливим приєднання ОПН до опори за допомогою гнучкого шлейфа, в який встановлюється спеціальний пристрій - відокремлювач (рис.7, а):

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			57

- не проявляє себе в нормальному режимі роботи, коли через ОПН проходять дуже малі струми провідності ОПН;
- не проявляє себе в режимі обмеження грозової і комутаційної перенапруги, коли через ОПН проходять імпульсні струми;
- руйнується (рис.7, б) при виході ОПН з ладу внаслідок протікання в ньому підвищених струмів промислової частоти.

У мережі з заземленою нейтраллю в разі ушкодження ОПН в ньому пройде струм однофазного короткого замикання мережі, який призведе до швидкого руйнування відокремлювача і від'єднання ОПН від лінії ще до вимкнення ПЛ головними вимикачами. Хоча лінія буде короткочасно відключена, її автоматичне повторне включення буде успішним. При цьому наявність розірваного шлейфа не заважає подальшій експлуатації ПЛ і під час огляду ПЛ однозначно вказує на пошкоджений апарат (рис.7, б).

У мережі з ізолюваною або компенсованою нейтраллю в разі пошкодження ОПН справа йде складніше, так як в ОПН протікають лише малі (ємнісні) струми однофазного замикання на землю, які не здатні привести до надійного спрацьовування звичайного відокремлювача. Відсутність конструкції відокремлювача для мереж 6-35 кВ до недавнього часу було фактором, серйозно стримує застосування ОПН на ПЛ 6-35 кВ. В даний час така конструкція, яка отримала назву «Універсальний відокремлювач» (УВ), розроблена, випробувана і запатентована. При однофазному замиканні в мережах 6-35 кВ внаслідок малості струмів релейний захист не може селективно виявити фідер з пошкодженням ізоляції, а працює лише на сигналізацію. Якщо замикання на землю пов'язано з пошкодженням одного з встановлених на лінії ОПН, то через кілька хвилин його УВ зруйнується, від'єднавши ОПН від лінії, відновивши нормальний режим роботи лінії і привівши до зникнення сигналізації.

При багатофазних пошкодженнях в мережі 6-35 кВ струми короткого замикання вже достатні для селективної роботи релейного захисту. Якщо одне з них пов'язано з пошкодженням встановленого на лінії ОПН, то в такому ОПН пройде струм короткого замикання, який призведе до швидкого (за частки секунди)

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			58

руйнування відповідного УВ, розриву шлейфу і від'єднання ОПН від лінії ще до вимкнення ПЛ головними вимикачами. При цьому розрив шлейфа:

- не дає пошкодженому ОПН заважати подальшої експлуатації ПЛ, забезпечуючи успішність АПВ;
- зменшує число місць мережі з порушенням ізоляції;
- під час огляду ПЛ однозначно вкаже на пошкоджений апарат (рис.7, б).

Наявність у ОПН іскрового проміжку, що не дозволяє використовувати будь-якої відокремлювач, може бути виправдано лише в деяких випадках при одиничній установці ОПН на протяжних ПЛ 330-750 кВ. У всіх інших випадках приєднання ОПН до ПЛ має бути безіскрова:

- через УВ в мережах з ізолюваною (компенсованою) нейтраллю;
- через УВ або звичайний відокремлювач в мережах з заземленою нейтраллю.

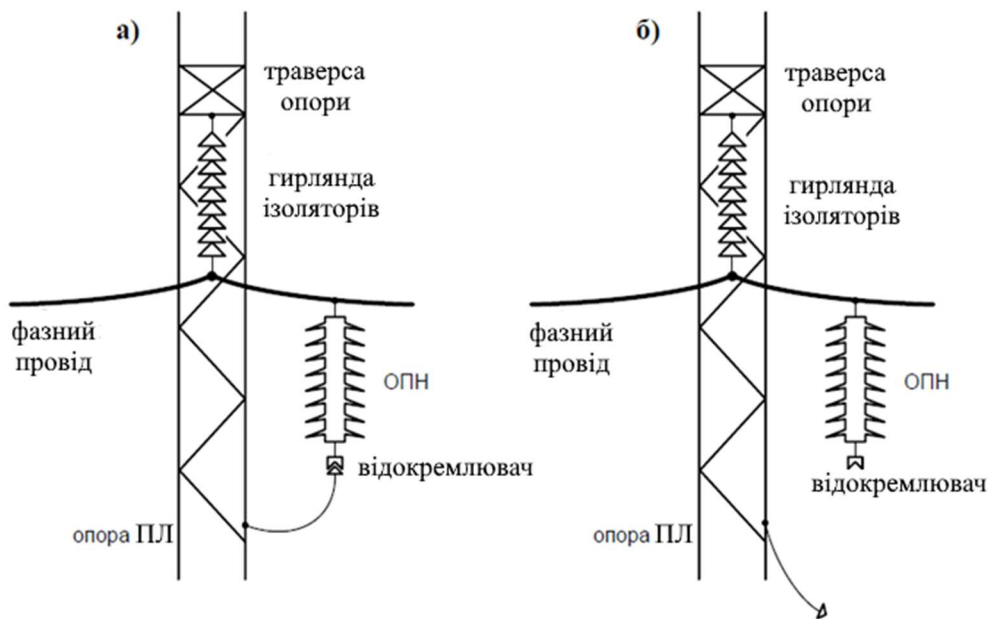


Рис.3.7. – Варіант приєднання до опори ОПН без іскрового проміжку через відокремлювач: (а) - до пошкодження ОПН, (б) - після пошкодження.

### 3.8. Типові та особливі випадки застосування ОПН 110-750 кВ

Для коректного вибору схем розташування і технічних характеристик ОПН 110-750 кВ необхідно проведення розрахунків:

- внутрішньої перенапруги на РП, до яких приєднані ПЛ- 750 кВ довжиною понад 200-300 км:

- внутрішньої перенапруги на РП 110-750 кВ, на яких у силових трансформаторів і автотрансформаторів не встановлені вимикачі на стороні високої напруги (в блокових і полублокових схемах); на практиці слід уникати таких схем, як потенційно небезпечних для обладнання з точки зору виникнення внутрішніх перенапруг, що зніме необхідність проведення розрахунків;

- внутрішніх перенапруг на електропередачах, оснащених пристроями поздовжньої компенсації (КПК);

- внутрішніх перенапруг в схемах електропостачання тягових підстанцій змінного струму 27,5 кВ від мереж 110-220 кВ:

- зовнішніх (грозових) перенапруг на ПЛ 110-750 кВ, які не володіють достатньою блискавкостійкістю, з метою визначення необхідності установки ОПН на ПЛ, числа і місць їх першочергового розміщення на ПЛ, вибору типу ОПН і основних його характеристик;

- перенапруг в розподільних пристроях 110-750 кВ з елегазовою ізоляцією (КРУЕ):

- перенапруг в розземлюючій нейтралі 110-220 кВ силових трансформаторів 110-220 кВ.

В інших випадках в проведенні спеціальних розрахунків перенапруги немає необхідності, а вибір схеми захисту обладнання і характеристик ОПН може бути проведений спрощено.

Для захисту від грозових перенапруг в мережах 110-750 кВ обов'язково встановлювати ОПН:

- на боці 110-750 кВ силових трансформаторів (Автотрансформаторів, шунтуювальних реакторів) для захисту від грозових перенапруг, викликаних грозовими хвилями, що набігають з приєднаних ПЛ 110-750 кВ; не допускається наявність комутаційних апаратів в ланцюзі між трансформатором (автотрансформатором, шунтувальним реактором) і захисним апаратом;

- поза посередньої близькості від кабельних муфт 110-750 кВ в місцях їх приєднання до ПЛ або до ошиновки РП;

Рекомендується додатково встановлювати ОПН:

									Лист
									60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДПп7110.141.010		ПЗ		

- на кожній приєднаній ПЛ в безпосередній близькості від РП (Наприклад, на найближчій до РП опорі ПЛ) або на збірні шини РП.

Розміщення захисних апаратів в РП 110-750 кВ повинно бути таким, щоб відстані до обладнання не перевищували максимально допустимих.

Ці відстані наведені в ТКП-339 в табличному вигляді для випадку захисту обладнання за допомогою вентиляльних розрядників і виконання спеціальних вимог до облаштування захищених тросами підходів ПЛ. В випадку використання замість розрядників сучасних ОПН максимально допустимі відстані і вимоги до захищених підходам можуть бути скориговані.

Дослідження дозволяють зробити ряд висновків і пропозицій, доповнюють вимоги ТКП-339 редакції в частині захисту від грозових перенапруг обладнання РП і облаштування захищених підходів:

- як високоефективний спосіб захисту обладнання від грозових (і комутаційних) перенапруг повинні бути рекомендовані до використання каскадні схеми, в яких захисні апарати встановлені на кожній приєднаній ПЛ 110-750 кВ поблизу від входу РП;

- наведені в таблицях технічного кодексу практики (ТКП-339) максимально допустимі відстані від обладнання до захисних апаратів вказані при грозовій активності не більше 30 грозових годин на рік; в разі, якщо число грозових годин в районі розташування більше або менше 30 на рік, допустимі відстані повинні бути пропорційно скориговані;

- при заміні розрядників на ОПН дозволяється перераховувати наведені в таблицях максимально допустимі відстані від захисних апаратів до силових трансформаторів, автотрансформаторів;

- не можна перераховувати максимально допустимі відстані від захисних апаратів до найбільш віддаленого обладнання РП (обладнання лінійних осередків), розташованого до захисних апаратів (РВ або ОПН) по ходу набігаючих з приєднаних ПЛ грозових хвиль;

- необхідно виключити примітку до ТКП-339, допускається не обмежувати відстані до віддаленого обладнання при великому числі приєднаних ПЛ 110, 150,

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			61

220 кВ; при великому числі ПЛ в якості максимально допустимих відстаней від захисних апаратів до віддаленого обладнання можна взяти ті відстані по ТКП-339, які вказані при

трьох і більше постійного включених ПЛ 110, 150, 220 кВ;

- допускається знижувати довжину тросового підходу ПЛ в порівнянні з значеннями, зазначеними в ПУЕ, в разі установки додаткових ОПН в її лінійну осередок;

- в разі підвищених опорів заземлення опор ПЛ 110-330 кВ на підходах до РП необхідно встановлювати додаткові ОПН 110-330 кВ, що розміщуються в лінійні осередки ПЛ або на збірні шини РП.

### **Висновок до розділу 3**

Обмежувачі перенапруги стали новим етапом у розвитку захисту від перенапруги. Вони повністю змістили свої попередників таких, як вентиляльні розрядники та іскрові проміжки. Відбулося це завдяки перевагам ОПН і саме переваги спричинили підвищення інтересу від виробників та науковців до покращення їх характеристик та методів їх застосування.

При виборі будь якого ОПН необхідно звертати увагу на наступні параметри:

- максимальна діюча напруга;
- номінальна напруга, еквівалентна величині, вплив якої ОПН здатний витримувати протягом 10 хвилин;
- струм провідності;
- номінальний розрядний струм;
- розрахунковий струм комутаційної перенапруги;
- струмова пропускна здатність;
- стійкість до короткого замикання.

Класифікація ОПН дуже широка, починаючи з різних матеріалів ізоляційної покривки і закінчуючи місцем встановлення. Комбінуючи різні класифікації, кількість різних видів ОПН та їх застосування стає надзвичайно великою.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			62

## Висновки по роботі

При виконанні дипломного проекту було отримано розвиток теорії по дальнім лініям електропередач. ДЕП змінного струму активно використовують у світі та в Україні і крім цього їх інтенсивно розвивають. Були розглянуті існуючі лінії та їх конструктивне виконання.

На прикладі реальної лінії електропередачі 750 кВ «Вінниця – Західноукраїнська» було проведено дослідження роботи цієї ЛЕП в різних режимах роботи:

- Режим синхронізації;
- Режим холостого ходу;
- Режим максимальних навантажень з різними активними та реактивними навантаженнями за умовами кінця.

Проаналізувавши отримані результати роботи ДЕП в режимах синхронізації, холостого ходу, максимального навантаження та розподіл шунтуючих реакторів на лінії, зробив наступні висновки, що в всіх режимах найбільш оптимальним як з економічної точки зору, так і з точки зору мінімальних втрат в ДЕП є режим розподілу реакторів 1-0.

А в режимі максимальних навантажень дотримання напруги вздовж всієї лінії у допустимих межах можливо не у всіх варіантах вибраної потужності. Зі зміною потужності навантаження треба передбачити комутуючий шунтувальний реактор в приймальній системі і в передавальній системі також реактор необхідно вимикати в деяких режимах.

Обмежувачі перенапруги перебувають на сьогодні в активному використанні із-за їх переваг в порівнянні з їх попередниками. Крім цього їх активно розвивають та досліджують для покращення їх використання.

Правильна установка ОПН в повітряних лініях 110-750 кВ дозволяє поєднати в собі функції обмеження і комутаційних і грозових перенапружень.

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			63

## Література

1. Экибастуз-Кокшетау (линия электропередачи) – интернет джерело – <https://wiki2.org/ru/>
2. Alberta Powerline. Побудова найбільшої лінії 500 кВ в Канаді – интернет джерело – <https://electricity.ca/lead/centre-of-excellence/alberta-powerline-builds-canadas-longest-500-kv-ac-transmission-line/>
3. Китай показує шлях за рахунок живлення на лінії 1000 кВ – интернет джерело – <https://www.globaltransmission.info/archive.php?id=1434>
4. Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission/книга під ред. Нео Zhou, Springer, 21 дек. 2017 г.
5. UHV Transmission Tehnology/ Книга під ред. The China Electric Power Research Institute, 18 жовтня 2017 року.
6. Ряды напряжений высоковольтных сетей в мире – интернет джерело – <https://forca.ru/spravka/spravka/ryady-napryazheniy-vysokovoltnyh-setey-v-mire.html>
7. Электричні мережі та системи. Проектування дальньої електропередачі змінного струму надвисокої напруги / Уклад.: В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе, О. М. Янковська. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 112 с.
8. Электричні мережі та системи: підручн. / В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПІ», 2008.
9. Конспект лекцій за курсом «Регулювання режимів електричних систем».
10. Ограничитель перенапряжения – интернет джерело – [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ограничитель\\_перенапряжения..](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ограничитель_перенапряжения..)
11. Школа молодого опника, назначение и принцип действия ОПН – интернет джерело – [http://baltenergo.spb.ru/articles\\_5.php](http://baltenergo.spb.ru/articles_5.php).
12. ОПН ограничители перенапряжения – интернет джерело – <http://atrans.in.ua/opn-ogranichiteli-perenapryazheniya/c24>.
13. Что такое ограничитель перенапряжения? – интернет джерело – 2017 – <https://samelectrik.ru/chto-takoe-ogranichitelperenapryazheniya.html..>

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			64

14. Область применения, выбор и расчет ОПН, установленных в сети 0,4-750кВ: Электронный учебный материал. Паперный Л.Е., Алейникова М.В. Минск. БНТУ. 2015.

15. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. –М.: Энергоатомиздат, 2004.

16. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. –Введ. 01.01.99. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. –50 с.

17. Объединенная энергетическая система Украины – интернет джерело – <http://energetika.in.ua/ru/books/book-4/section-2/section-3>

18. Промежуточные металлические опоры для ВЛ 750 кВ – интернет джерело – <https://xn----7sb8ajafee4j.xn--p1ai/promezhutochnie-metallicheskie-opori-dlya-vl-750kv-tipa-pp750-ps750-pn750/>

19. Что такое ограничитель перенапряжения? – интернет джерело – <https://samelectrik.ru/chto-takoe-ogranichitel-perenapryazheniya.html>

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			65

Власник документу:  
приховано налаштуваннями конфіденційності

ID перевірки:  
1003939131

Дата перевірки:  
10.06.2020 17:44:58 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Library + My Database

Дата звіту:  
10.06.2020 17:46:56 EEST

ID користувача:  
41938

Назва документу: ПЗ Фурман

ID файлу: 1003954528 Кількість сторінок: 62 Кількість слів: 12475 Кількість символів: 87984 Розмір файлу: 1.53 MB

## 14% Схожість

Найбільша схожість: 4.83% з джерело бібліотеки. ID файлу: 2077880

Не знайдено жодних джерел з Інтернету

9.85% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту

323

Page 64

## 0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

## 0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

## Підміна символів

Заміна символів

110

					ДПп7110.141.010	ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			66