

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет ”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2021 р

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему « Аналіз методів дослідження перенапруги в електричних мережах»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКзм-19
(шифр групи)

напрямок підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Муляр О. О.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник к. т. н. Шеїна Г.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Муляр Олександр Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз методів дослідження перенапруги
в електричних мережах

керівник роботи к. т. н. Шеїна Г.О.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 30 травня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: _____

оперативна схема мережі

тип обладнання підстанції

тип ліній електропередачі, марка проводу, довжина

навантаження споживачів і категорія надійності

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Атмосферні перенапруги в електричних системах

2. Розрахунок захисту підстанцій від перевантажень

3. Аналіз перенапруги для підстанції 750кВ

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 3	Шейна Г.О.		
Розділ 4	Біла Н. С.		

7. Дата видачі завдання 01 березня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	02.03–30.03.21	
2.	Розділ 2	31.03–21.04.21	
3.	Розділ 3	22.04–19.05.21	
4.	Розділ 4	20.05–30.05.21	
5.			
6.			

Студент

(підпис)

Муляр О. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Шейна Г.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Муляр О. О. Аналіз методів дослідження перенапруги в електричних мережах / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі досліджувалися хвильові процеси в лініях електропередачі, що виникають при комутаціях будь-якого типу: включення на напругу джерела живлення, відключення від джерела живлення, виникнення коротких замикань, ураження ліній електропередачі блискавкою.

У другому розділі досліджувалися хвильові процеси в силових трансформаторах. Розглянутий вплив імпульсної корони, вплив перенапруги на обмотки трансформатора.

У третьому розділі досліджувалися перенапруги в автотрансформаторах підстанції 750 кВ. Виконаний розрахунок коротких замикань. Розглянуті системні рішення щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги.

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

Ключові слова: лінії електропередачі, комутації, джерело живлення, короткі замикання, силові трансформатори, імпульсна корона, захист, системні рішення.

Список публікацій здобувача:

1. Захист від перенапруги силових трансформаторів 750 кВ / Муляр О.О., Кардаш Д.О., Шеїна Г.О.// III Міжнародна науково-технічна інтернет-конференції «Новітні технології в освіті, науці та виробництві». Покровськ. 2021.

ANNOTATION

Muliar Oleksandr Oleksandrovykh. Analysis of overvoltage research methods in electrical networks / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 141 "Electricity, electrical engineering and electromechanics". – DonNTU, Pokrovsk, 2021.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions and a list of sources used.

The first section examines the wave processes in power lines that occur during switching of any type: switching on the power supply, disconnection from the power supply, the occurrence of short circuits, damage to power lines by lightning.

The second section investigates wave processes in power transformers. The influence of the pulse corona, the influence of overvoltage on the transformer windings is considered.

In the third section, surges in 750 kV substation autotransformers were investigated. The calculation of short circuits is performed. System solutions for protection of substation transformers from overvoltage are considered.

The fourth section deals with issues of labor protection.

Keywords: power lines, switching, power supply, short circuits, power transformers, pulse corona, protection, system solutions.

List of applicant publications:

1. Overvoltage protection of 750 kV power transformers / Muliar O. O., Kardash D. O., Sheina G.O. // III International scientific and technical Internet conference "The latest technologies in education, science and production". Pokrovsk. 2021.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Атмосферні перенапруги в електричних системах	8
1.1 Хвильові процеси в лініях електропередачі	8
1.2 Частні практичні випадки	17
1.3 Коливальні хвильові процеси	23
1.4 Розрахунок хвиль для вузлових точок	29
1.5 Висновки за першим розділом	41
Розділ 2 Розрахунок захисту підстанцій від перевантажень	42
2.1 Особливості багато провідних ЛЕП	42
2.2 Дослідження перенапруги в обмотках трансформатора	49
2.3 Висновки за другим розділом	56
Розділ 3. Аналіз перенапруги для підстанції 750кВ	57
3.1 Моделювання ділянки мережі	57
3.2 Аналіз отриманих результатів	66
3.3 Висновки за третім розділом	74
Розділ 4 Охорона праці	75
Висновки	81
Список використаної літератури	82

ВСТУП

Процеси, які протікають в електричних мережах, характеризуються значною швидкістю протікання процесів, та значною величиною струмів та напруг при аварійних процесах.

В даній роботі розглянуті процеси, які виникають в лініях електропередачі і силових трансформаторах при атмосферних і комутаційних перенапругах [1]. Атмосферні перенапруги розділяють на два типи: прямі, які виникають внаслідок прямого удару блискавки; та індукційні – виникають при будь-яких комутаціях.

Прямі перенапруги досягають значень достатніх для перекриття ізоляції будь-якого класу напруги. Захист ліній електропередачі від них – підвіска заземлених грозозахисних тросів, захист обладнання підстанцій – встановлення блискавковідводів. В даній роботі увага була приділена дослідженню хвильові процеси в лініях електропередачі, що виникають при комутаціях, які виникають при включенні на напругу джерела живлення, при відключенні від джерела живлення, при виникненні коротких замикань, при ураженні ліній електропередачі блискавкою. Крім того, досліджувалися хвильові процеси в силових трансформаторах, вплив імпульсної корони, вплив перенапруги на обмотки трансформатора.

Метою даної роботи є розгляд перенапруги в автотрансформаторах підстанції 750 кВ, розгляд системних рішень щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги.

Це дозволяє отримати теоретичні знання і практичні навички захисту обладнання електричних мереж від перенапруги. В умовах нашої реальності, коли електричні мережі є зношеними, а ізоляція обладнання є старою і фізично не може витримати можливі перенапруги, тема роботи є актуальною.

РОЗДІЛ 1 АТМОСФЕРНІ ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

Атмосферні перенапруги розділяють на два типи:

- прямі перенапруги – виникають внаслідок прямого удару блискавки (пуб);
- індукційні перенапруги – виникають при будь-яких комутаціях (роздивимося у р. 1.1);

Прямі перенапруги досягають значень достатніх для перекриття ізоляції будь-якого класу напруги.

Захист ліній електропередачі (ЛЕП) від прямих перенапруг – підвіска заземлених грозозахисних тросів з метою екранування проводів. Автоматичне повторне включення (АПВ) підвищує надійність роботи ЛЕП при короткочасних ушкодженнях, які самоусуваються при зникненні напруги.

Захист обладнання підстанцій (ПС) – встановлення блискавковідводів.

1.1 Хвильові процеси в лініях електропередачі

Хвильові процеси в ЛЕП виникають при будь-яких комутаціях [2-10]:

- включення на напругу джерела живлення (ДЖ);
- відключення від ДЖ;
- виникнення коротких замикань (КЗ);
- ураження ЛЕП ударом блискавки.

Електромагнітне збурення від точки виникнення поширюється в обох напрямках і супроводжується втратами енергії на нагрів й на іонізацію повітря навколо проводу. Диференційні рівняння при нехтуванні цими втратами приймають наступний вигляд:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$

(1.1)

де L_0, C_0 - погонні параметри ЛЕП на одиницю довжини, відповідно (індуктивний опір та ємнісна провідність).

Рішенням цих рівнянь є хвильові функції напруги та струму:

$$\left. \begin{aligned} u &= u^+ + u^- = \underbrace{F^+(x - v \cdot t)}_{\text{пряма хвиля}} + \underbrace{F^-(x + v \cdot t)}_{\text{зворотня хвиля}} \\ i &= i^+ - i^- = \underbrace{\frac{1}{z} F^+(x - v \cdot t)}_{\text{пряма хвиля}} - \underbrace{\frac{1}{z} F^-(x + v \cdot t)}_{\text{зворотня хвиля}} \end{aligned} \right\}$$

(1.2)

Хвильовий опір ЛЕП, якщо не враховувати втрати потужності, визначається наступним чином:

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

(1.3)

Швидкість розповсюдження хвилі, як відомо, є залежною від наступних параметрів

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon' \mu'}}$$

(1.4)

З урахуванням того, що швидкість світла складає

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек} = 300 \text{ м/мксек}$$

якщо враховувати конструкцію ліній електропередачі, то

$$\left. \begin{array}{l} \text{повітряні ЛЕП } \varepsilon' = \mu' = 1 \implies v = c \\ \text{кабельні ЛЕП } \varepsilon' \approx 4, \mu' = 1 \implies v = \frac{c}{2} \end{array} \right\}$$

Параметри хвиль є функціями просторових координат $x - v \cdot t$ і $x + v \cdot t$ в заданий момент часу t . Ці ж хвилі є функціями часу.

Якщо t – час початку процесу в точці $x = 0$, а v – швидкість хвилі, то час, що визначається від моменту приходу початку хвилі у точку x

$$t' = t - \frac{x}{v}$$

Таким чином, пряма й обернена хвиля, складають:

$$\left. \begin{array}{l} F^+(t') = F^+\left(t - \frac{x}{v}\right) \\ F^-(t') = F^-\left(t - \left(-\frac{x}{v}\right)\right) = F^-\left(t + \frac{x}{v}\right) \end{array} \right\}$$

З рівняння (1.2) робиться висновок, що для прямих та зворотних хвиль є справедливі твердження:

$$i^+ = \frac{u^+}{z}$$

$$i^- = \frac{u^-}{z}$$

Хвильовий опір залежить від конструкції ЛЕП:

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 60 \ln \left(\frac{2h}{r_{np}} \right) = 138 \lg \left(\frac{2h}{r_{np}} \right)$$

де h – середня висота проводу над землею, r_{np} – радіус проводу.

На практиці для різних конструкцій ЛЕП

$$\left. \begin{array}{l} \text{повітряні ЛЕП} \implies z = \begin{cases} 350 - 400 \text{ Ом з розщепленням} \\ 450 - 550 \text{ Ом без розщеплення} \end{cases} \\ \text{кабельні ЛЕП} \implies z = 5 - 20 \text{ Ом} \end{array} \right\}$$

Висновок: за умови однакової напруги мережі хвиля напруги буде більше в кабельній ЛЕП, ніж у повітряній, через різницю хвильового опору.

З рівнянь (1.3) і (1.4) отримуються індуктивність та ємність ЛЕП:

$$\left. \begin{array}{l} L = L_0 \cdot l = \frac{z}{v} \cdot l \\ C = C_0 \cdot l = \frac{1}{z \cdot v} \cdot l \end{array} \right\} \quad (1.5)$$

Далі у роботі використовуються наступні позначення: A – вузлова точка; z_n – комплексне навантаження, яке складається з r, L, C ; u^+, u^-, u – напруга падаючої, відбитої, заломленої хвиль відповідно; i^+, i^-, i – струми падаючої, відбитої, заломленої хвиль відповідно.

З рівняння (1.2) маю систему рівнянь, яка використовується для визначення параметрів заломленої хвилі

$$\left. \begin{aligned} u &= u^+ + u^- \\ i \cdot z &= u^+ - u^- \end{aligned} \right\}$$

Таким чином

$$u + i \cdot z = 2 \cdot u^+ \quad (1.6)$$

Згідно рис. 1.1, а u, i – напруга на навантаженні, струм в навантаженні.

Рисунок 1.1, б є розрахунковою схемою заміщення – схемою Петерсона.

Отже алгоритм розрахунків має наступні етапи:

По-перше, визначаються параметри навантаження z_n і системи електропередачі z , шляхом заміни кола зі розподіленими параметрами колом зі зосередженими параметрами.

Наступним етапом задається напруга джерела живлення $u_0 = 2 \cdot u^+$.

За виразом (1.6) визначаються напруга і струм заломленої хвилі, а напруга заломленої хвилі далі використовується для визначення напруги відбитої хвилі:

$$u^- = u - u^+$$

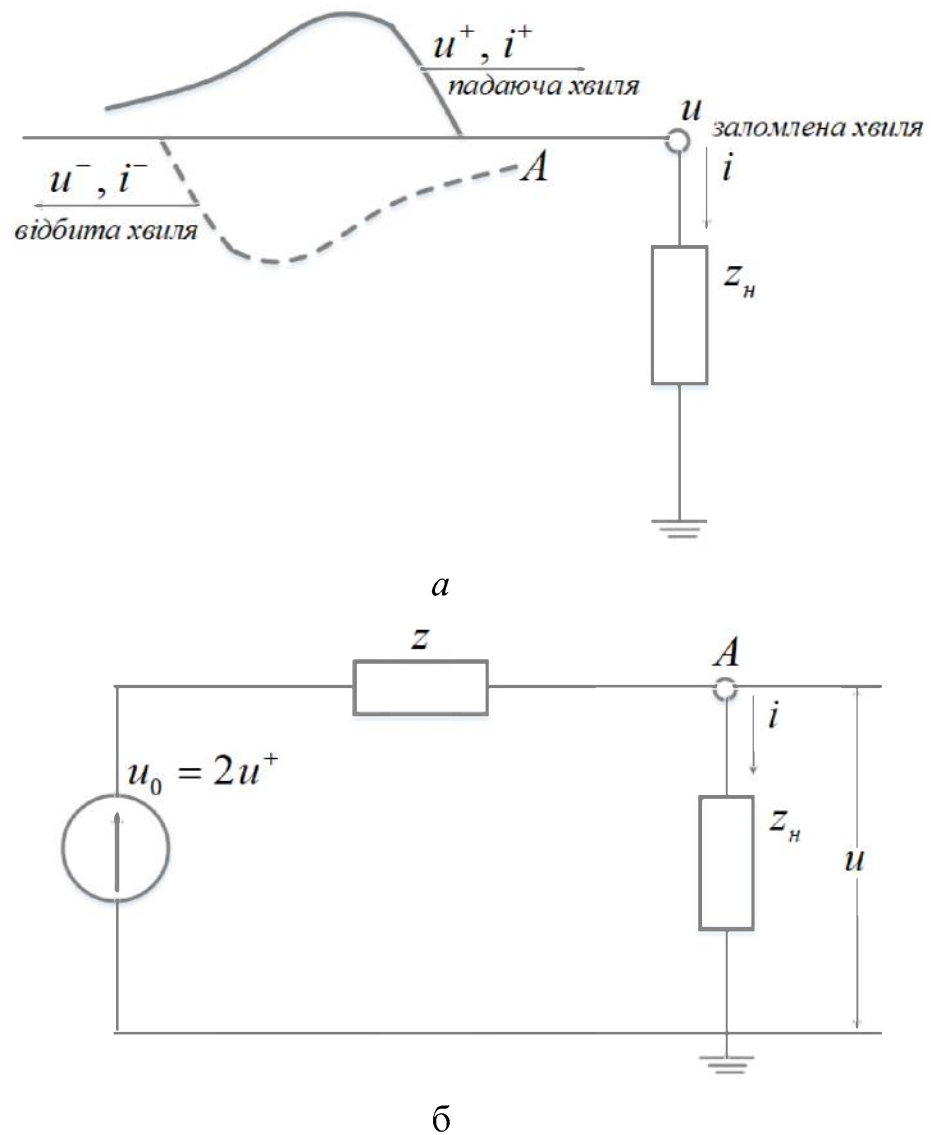


Рисунок 1.1 – Для параметрів заломленої хвилі

Для зручності розрахунків використовують метод операторних перетворень.

На його основі комплексний опір навантаження z_n представляється операторним опором $z_n(p)$, який включає операторні опори r , pL , $\frac{1}{pC}$.

Таким чином, зв'язок між падаючою u^+ , заломленою u і відбитою u^- хвилями визначається через коефіцієнт заломлення α і коефіцієнт відбиття β відповідно:

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_H}{z + z_H} \quad \beta = \frac{z_H - z}{z_H + z} \quad (1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

З рівняння (1.7)

$$\alpha - \beta = \frac{2 \cdot z_H}{z + z_H} - \frac{z_H - z}{z_H + z} = 1$$

В залежності від виду навантаження можливі різні значення коефіцієнта заломлення α і коефіцієнта відбиття β :

якщо $z_H(p) = r$, то α, β – дійсні числа;

якщо $z_H(p) = \infty$, режим холостого ходу (ХХ), то

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_H}{z + z_H} = \frac{2 \cdot \infty}{z + \infty} = \frac{2 \cdot \frac{\infty}{\infty}}{\frac{z}{\infty} + \frac{\infty}{\infty}} = \frac{2 \cdot 1}{0 + 1} = 2$$

$$\beta = \frac{z_H - z}{z_H + z} = \frac{\infty - z}{\infty + z} = \frac{\frac{\infty}{\infty} - \frac{z}{\infty}}{\frac{\infty}{\infty} + \frac{z}{\infty}} = \frac{1 - 0}{1 + 0} = 1$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ = 2 \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ = 1 \cdot u^+ \end{aligned} \right\}$$

якщо $z_n(p) = 0$, режим короткого замикання (КЗ), то

$$\alpha = \frac{2 \cdot z_n}{z + z_n} = \frac{2 \cdot 0}{z + 0} = 0$$

$$\beta = \frac{z_n - z}{z_n + z} = \frac{0 - z}{0 + z} = -1$$

$$\left. \begin{aligned} u &= \alpha \cdot u^+ = 0 \cdot u^+ \\ u^- &= \beta \cdot u^+ = -1 \cdot u^+ \end{aligned} \right\}$$

Висновок:

- режим ХХ – струм навантаження буде спадати до нуля, а *напруга на навантаженні подвоюватися*. Напруга відбитої хвилі буде зберігати знак.

- режим КЗ – напруга навантаження буде спадати до нуля, а струм на навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде змінювати знак.

Таким чином, коли обладнання підстанції тримається під охоронною напругою в режимі близькому до ХХ, то ми маємо велику вірогідність виникнення пошкодження обладнання під час атмосферної перенапруги.

Для можливості аналізу процесів, які виникають при руху хвиль, використовують три типи хвиль:

- хвилі прямокутної форми $u_0(t) = U_0$ тривалістю t_{xe} (рис. 1.2);

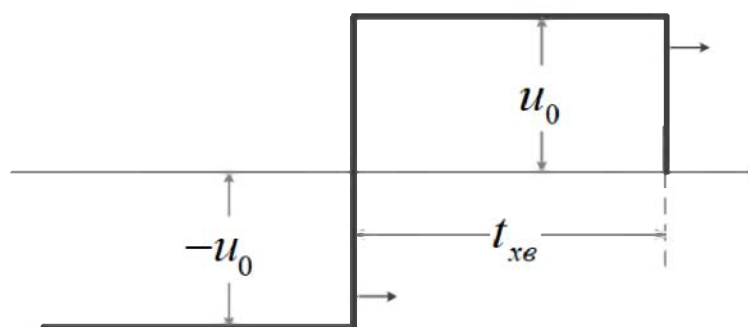


Рисунок 1.2 – Приклад прямокутної хвилі

- хвилі косокутної форми $u_0(t) = \alpha \cdot t$ тривалістю фронту $t_{\text{фр}}$ (рис. 1.3);

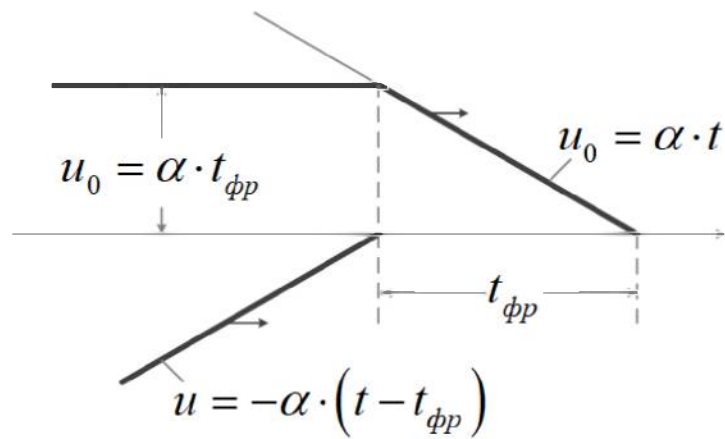


Рисунок 1.3 – Приклад косокутної хвилі

- хвилі аперіодичної $u_0(t) = u_0 \cdot (e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t})$ або експоненціальної $u_0(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$ форм (рис. 1.4)

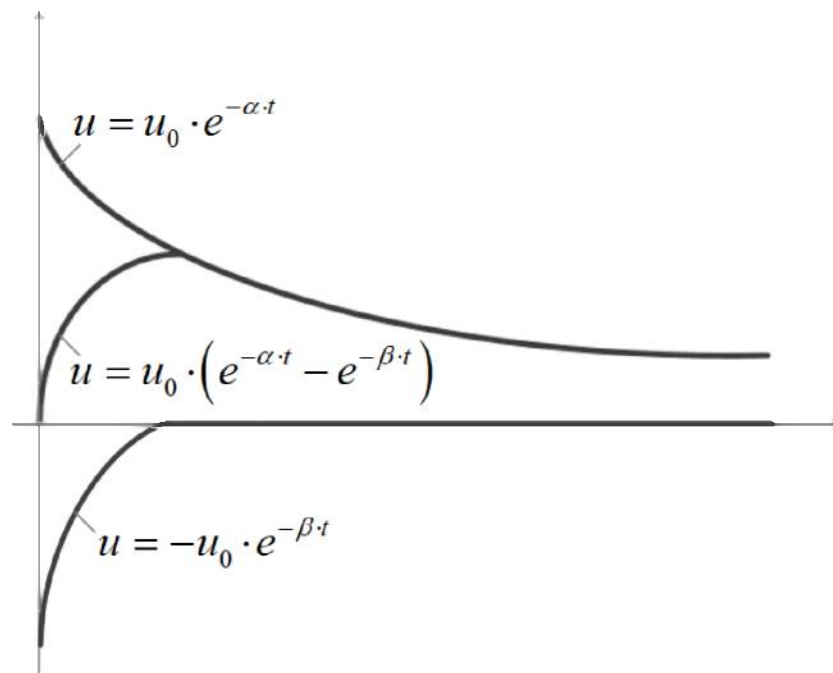


Рисунок 1.4 – Приклад експоненціальної та аперіодичної хвиль

Якщо прийняти, що до електричної схеми прикладена хвиля одиничної величини (падаюча хвиля)

$$u^+ = u_0 = 1$$

то заломлена хвиля (струму чи напруги) може представлятися перехідною функцією $u(t) = h(t)$ і за допомогою інтеграла Дюамеля знаходиться невідоме значення заломленої напруги $u(t)$ при будь-якій формі прикладеної напруги $u_0(t)$.

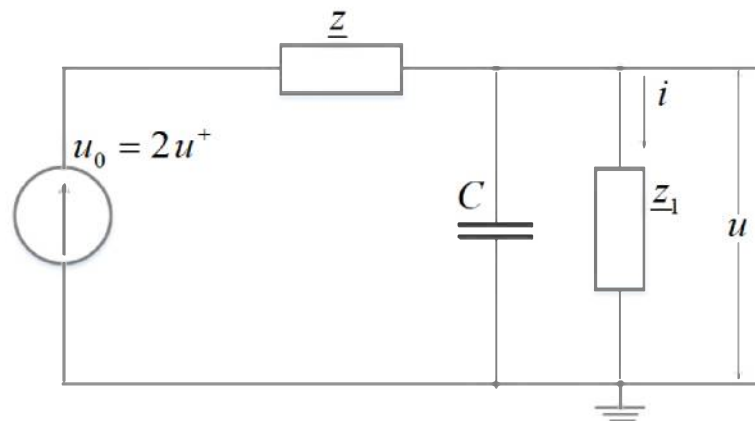
1.2 Частні практичні випадки

Наприклад, до шин підстанції, що розглядаються підключається лише ємність – рис.1.5, а.

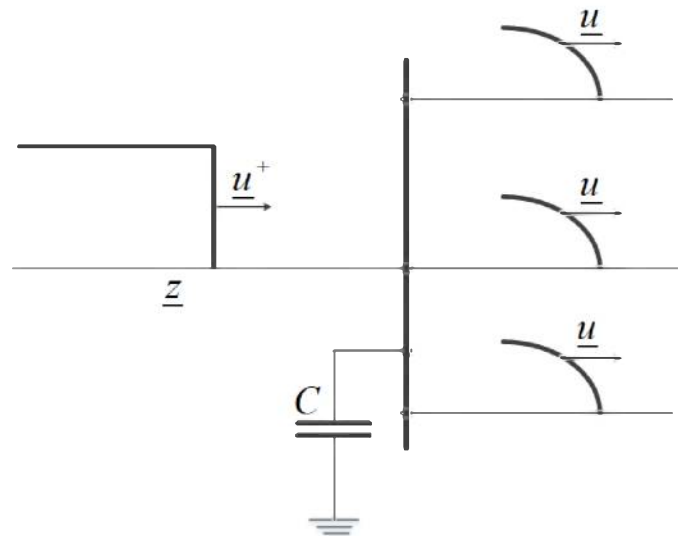
Тоді (рис. 1.5, б):

$$\begin{aligned}
 u(p) &= u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\bar{z}_1 \parallel \frac{1}{pC}}{\bar{z} + \left(\bar{z}_1 \parallel \frac{1}{pC} \right)} = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\frac{\bar{z}_1 \cdot \frac{1}{pC}}{\bar{z}_1 + \frac{1}{pC}}}{\bar{z} + \frac{\bar{z}_1 \cdot \frac{1}{pC}}{\bar{z}_1 + \frac{1}{pC}}} = \\
 &= u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\frac{\bar{z}_1 \cdot \frac{1}{pC}}{\bar{z}_1 \cdot pC + 1}}{\frac{\bar{z} \cdot \frac{\bar{z}_1 \cdot pC + 1}{pC} + \bar{z}_1 \cdot \frac{1}{pC}}{\frac{\bar{z}_1 \cdot pC + 1}{pC}}} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_1 \cdot pC + 1}}{\frac{\underline{z} \cdot (\underline{z}_1 \cdot pC + 1) + \underline{z}_1}{\underline{z}_1 \cdot pC + 1}} = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\underline{z}_1}{\underline{z} \cdot (\underline{z}_1 \cdot pC + 1) + \underline{z}_1} = \\
 &= u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\underline{z}_1}{\underline{z}_1 + \underline{z} + \underline{z} \cdot \underline{z}_1 \cdot pC} = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{\underline{z} \cdot C} \cdot \frac{1}{\frac{\underline{z}_1 + \underline{z}}{\underline{z}_1 \cdot \underline{z} \cdot C} + p}
 \end{aligned}$$



a



б

Рисунок 1.5 – Падіння напруги на шини підстанції з ємністю

Наступний приклад, коли в розріз ЛЕП, що живить підстанцію, включена індуктивність – рис.1.6, а.

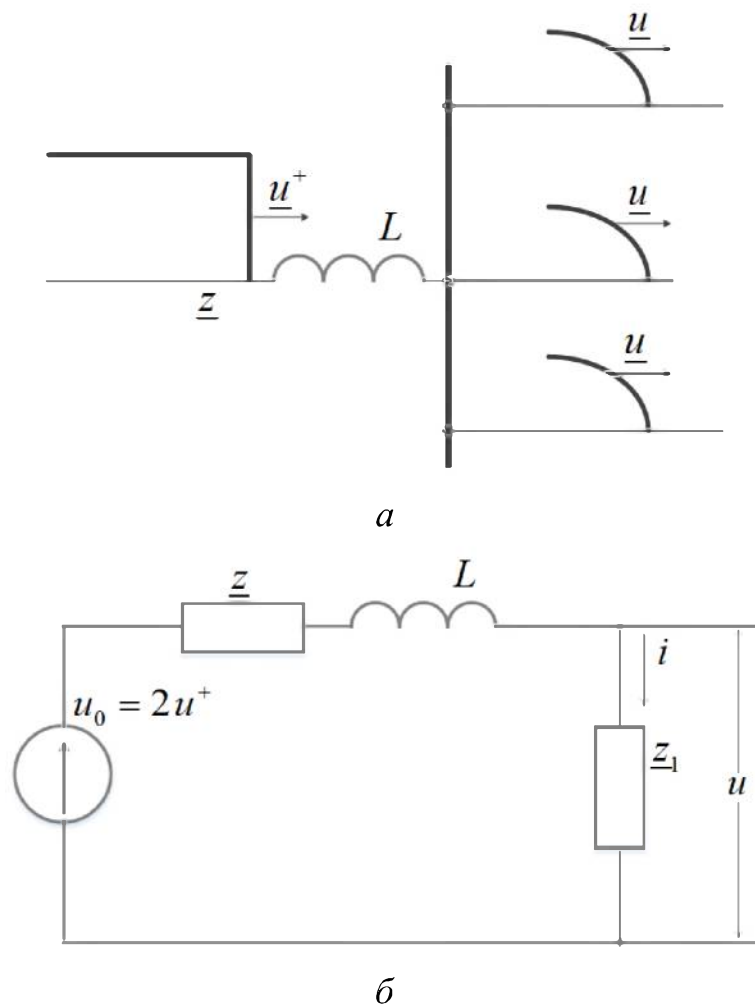


Рисунок 1.6 – Падіння напруги на шини підстанції з індуктивністю в ЛЕП

Тоді (рис. 1.6, б):

$$u(p) = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\underline{z}_1}{\underline{z} + pL + \underline{z}_1} = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\underline{z}_1}{L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\underline{z} + \underline{z}_1}{L} + p\right)}$$

Наступним етапом є перехід від зображень до оригіналів:

1) для схеми на рис. 1.5, а:

$$u(p) = \frac{u_0}{\underline{z}C} \cdot \frac{1}{p \left(\frac{\underline{z}_1 + \underline{z}}{\underline{z}_1 \underline{z} C} + p \right)} \Rightarrow u(t) = u_0 \frac{\underline{z}_1}{\underline{z} + \underline{z}_1} \left(1 - e^{-\frac{1}{\left(\frac{C \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \right)}} \right)$$

$$T_c = \frac{C \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}}$$

2) для схеми на рис. 1.6, б:

$$u(p) = u_0 \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{\underline{z}_1}{L} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\underline{z} + \underline{z}_1}{L} + p \right)} \Rightarrow u(t) = u_0 \frac{\underline{z}_1}{\underline{z} + \underline{z}_1} \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \right)} \right)$$

$$T_L = \frac{L}{\underline{z}_1 + \underline{z}}$$

Вище було показано, що для повітряних ЛЕП $z = 350 - 550 \text{ Ом}$, а для КЛЕП $z = 5 - 20 \text{ Ом}$.

Власна ємність підстанцій (зі всією апаратурою) може складати $C = 0,001 - 0,005 \text{ мкф}$.

Таким чином, якщо розглядаємо підключення підстанції радіальною ЛЕП, то

- для повітряної ЛЕП

$$T_c = \frac{C \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx C \cdot \underline{z} = (0,001 - 0,005) \cdot 500 = 0,5 \div 2,5 \text{ мксек}$$

- для кабельною ЛЕП

$$T_c = \frac{C \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx C \cdot \underline{z} = (0,001 - 0,005) \cdot 20 = 0,02 \div 0,1 \text{ мксек}$$

Якщо включити ємність порядку $C = 0,5 - 1 \text{ мкф}$ на вході підстанції, то

- для повітряної ЛЕП

$$T_{C\Sigma} = \frac{C \cdot \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx C \cdot \underline{z} = (0,5 - 1) \cdot 500 = 250 \div 500 \text{ мксек}$$

- для кабельною ЛЕП

$$T_{C\Sigma} = \frac{C \cdot \underline{z}_1 \underline{z}}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx C \cdot \underline{z} = (0,5 - 1) \cdot 20 = 10 \div 20 \text{ мксек}$$

Якщо включити індуктивність порядку $L = 2 \div 5 \text{ мГн}$ в розріз ЛЕП, що живить прохідну підстанцію, то

- для повітряної ЛЕП ($\underline{z}_1 = \underline{z} = 500 \text{ Ом}$)

$$T_{L\Sigma} = \frac{L}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx \frac{(2 \div 5) \cdot 10^{-3}}{500 + 500} = 2 \div 5 \text{ мксек}$$

- для кабельною ЛЕП ($\underline{z}_1 = \underline{z} = 5 \div 20 \text{ Ом}$)

$$T_{L\Sigma} = \frac{L}{\underline{z}_1 + \underline{z}} \approx \frac{(2 \div 5) \cdot 10^{-3}}{20 + 20} = 50 \div 125 \text{ мксек}$$

Для тупикової підстанції, де $\underline{z}_1 = \infty$ постійна часу $T_L \approx 0$, тобто реактор не виконує функцію згладжування напруги.

Висновок:

- для підстанцій, які отримують живлення повітряними ЛЕП, доцільним є використання ємності для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі;

- для підстанцій, які отримують живлення *кабельними ЛЕП*, доцільним є використання *індуктивності* для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі.

Як показано на рис. 1.7, якщо падаюча хвиля $u^+(t)$ має обмежену довжину, то її можна представити накладенням двох нескінченних хвиль $u_1^+(t)$ і $u_2^+(t)$ протилежного знаку зі зміщенням тривалістю $t_{xв}$. Так само, заломлена хвиля $u(t)$ визначається складанням двох складових $u_1(t)$ і $u_2(t)$.

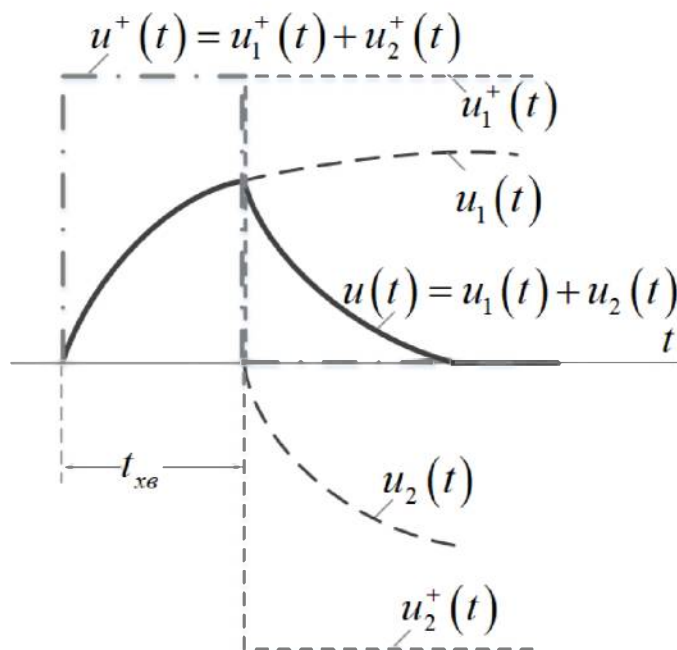


Рисунок 1.7 – Форма хвиль напруги

Максимальне значення заломленої хвилі виникає в момент часу $t = t_{xв}$:

$$U_{\max} = u_0 \cdot \frac{\underline{z}_1}{\underline{z} + \underline{z}_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{xв}}{T}} \right). \quad (1.9)$$

Рівняння (1.9) дозволяє зробити висновок щодо впливу ємності та індуктивності на хвилю напруги.

Висновок: індуктивність та ємність можуть здійснити істотний вплив на амплітуду хвилі напруги за умови, що $t_{\text{хв}} \ll T$.

Таким чином

$$e^{-\frac{t_{\text{хв}}}{T}} \approx 1 - \frac{t_{\text{хв}}}{T}$$

Рівняння (1.9) прийме вид:

$$U_{\text{max}} \approx u_0 \cdot \frac{\underline{\varepsilon}_1}{\underline{\varepsilon} + \underline{\varepsilon}_1} \cdot \frac{t_{\text{хв}}}{T}$$

Для чисельних значень постійних часу $T_{L\Sigma}$, $T_{c\Sigma}$ що були розраховані раніше, можна зробити наступний висновок: індуктивності та ємності можуть різко знизити амплітуду як зрізаних, так повних заломлених хвиль.

Роздивимося вплив індуктивності й ємності на відображену хвилю:

- ємність, що в момент часу $t=0$ еквівалентна режиму КЗ, у відбитої хвилі змінює напрямок;
- індуктивність еквівалента режиму ХХ, у відбитої хвилі зберігається напрямок.

Висновок:

- ємність виконує захисні функції в усіх напрямках, як заломленої, так і відбитої хвилі.
- індуктивність лише згладжує заломлену хвилю.

1.3 Коливальні хвильові процеси

Роздивимося вплив хвилі на коливальний $L-C$ контур.

Для ємності:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

$$u_c(p) = \frac{u_0}{p} \cdot \frac{1}{pL + \frac{1}{pC}} \cdot \frac{1}{pC} = \frac{u_0}{LC} \cdot \frac{1}{p \cdot \left(p^2 + \frac{1}{LC}\right)} \Rightarrow u_c(t) = u_0 \cdot \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right)\right]$$

Максимальне значення хвилі виникає за умови:

$$\left. \begin{array}{l} t = T/2 \\ 2u_0 = 4u^+ \end{array} \right\}$$

Тобто довжина хвилі повинна складати $t_{xg} = T/2$.

Якщо довжина хвилі $t_{xg} < T/2$, то згідно методу накладення хвиль різних поляриностей зміщених на час t_{xg}

$$\begin{aligned} u_c(t) &= u_0 \cdot \left(\left[1 - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right)\right] - \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{t-t_{xg}}{T}\right)\right] \right) = \\ &= u_0 \cdot \left(\cos\left(2\pi \frac{t-t_{xg}}{T}\right) - \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \right) = \\ &\left\{ \sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \right\} \\ &= 2u_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{t_{xg}}{2}\right)\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi t_{xg}}{T}\right) \end{aligned}$$

Так само, визначаємо умови виникнення максимального значення:

$$\left. \begin{aligned} t = \frac{t_{\lambda\theta}}{2} = \frac{T}{4} \\ U_{C\max} = 2u_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi t_{\lambda\theta}}{T}\right) \end{aligned} \right\}$$

При малих $t_{\lambda\theta}$ враховується перша складова ряду розкладення

$$\left. \begin{aligned} \sin\left(\frac{\pi t_{\lambda\theta}}{T}\right) &\approx \frac{\pi t_{\lambda\theta}}{T} \\ U_{C\max} &\approx 2u_0 \cdot \frac{\pi t_{\lambda\theta}}{T} \end{aligned} \right\}$$

Якщо хвиля має косокутну форму:

$$\left. \begin{aligned} u_0(t) &= \alpha t \\ h(\tau) &= 1 - \cos(\omega_0 t) \\ \omega_0 &= \frac{2\pi}{T} \\ u_c(t) &= u_0(t) \cdot h(t) + \int_0^t u_0'(t-\tau) \cdot h(\tau) d\tau \end{aligned} \right\}$$

отримуємо

$$u_c(t) = \alpha t - \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 t)$$

Для хвилі косокутної форми, в залежності від довжини хвилі, напруга визначається двома шляхами.

У першому випадку, за формулою наведеною вище:

$$\left. \begin{aligned} t < t_{\dot{\varphi}p} \\ u_c(t) = \alpha t - \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 t) \end{aligned} \right\}$$

У другому випадку, як сума

$$\left. \begin{aligned} t > t_{\dot{\varphi}p} \\ u_c(t) = \left[\alpha t - \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 t) \right] - \left[\alpha \cdot (t - t_{\dot{\varphi}p}) - \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 [t - t_{\dot{\varphi}p}]) \right] \end{aligned} \right\}$$

Виконавши підстановку та перетворення, отримуємо наступні вирази:

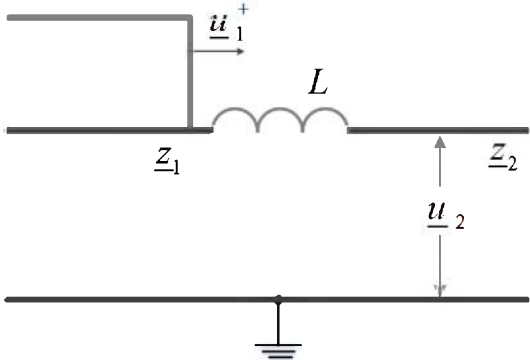
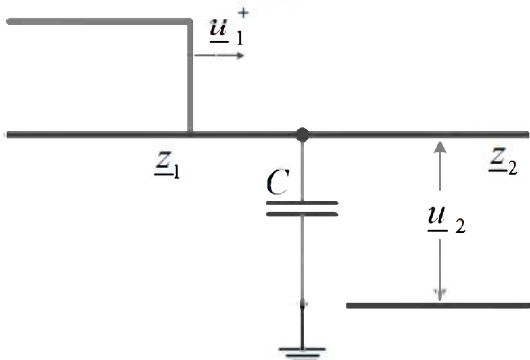
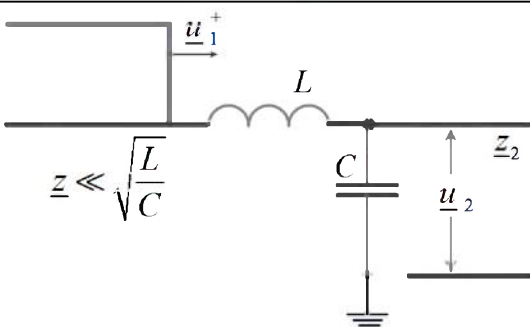
$$\left. \begin{aligned} \alpha \cdot t_{\dot{\varphi}p} &= u_0 \\ \omega_0 &= \frac{2\pi}{T} \\ u_c(t) &= u_0 \left[1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi t_{\dot{\varphi}p}}{T}\right)}{\frac{\pi t_{\dot{\varphi}p}}{T}} \cdot \cos\left(\omega_0 \left(t - \frac{t_{\dot{\varphi}p}}{2}\right)\right) \right] \end{aligned} \right\}$$

Максимальне значення напруги виникає при особливих умовах:

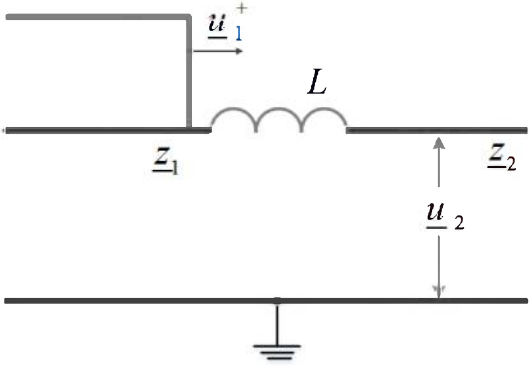
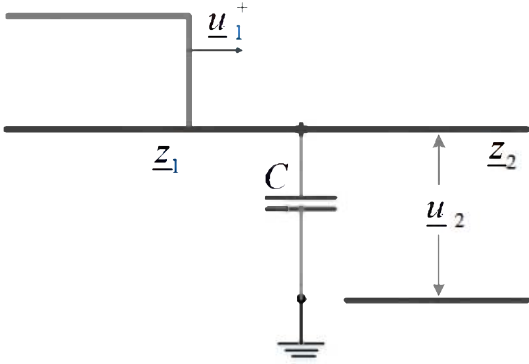
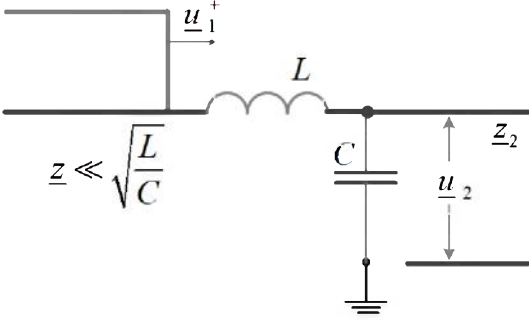
$$\left. \begin{aligned} \omega_0 \left(t - \frac{t_{\dot{\varphi}p}}{2} \right) &= -\pi \\ u_{c\max} &= u_0 \left[1 + \frac{\sin\left(\frac{\pi t_{\dot{\varphi}p}}{T}\right)}{\frac{\pi t_{\dot{\varphi}p}}{T}} \right] \end{aligned} \right\}$$

Отримані залежності зведені у табл. 1.1.

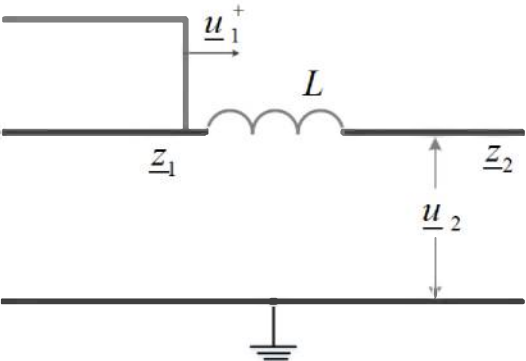
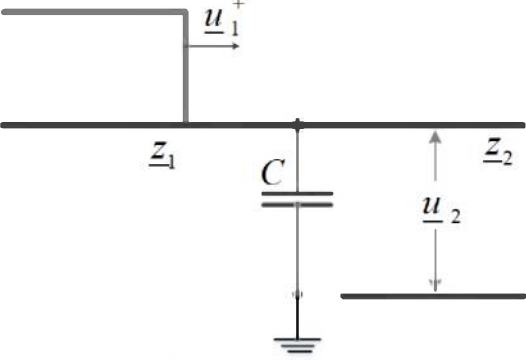
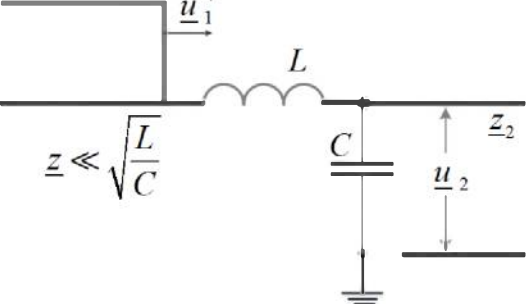
Таблиця 1.1 – Визначення заломленої хвилі

Схема	T	Падаюча хвиля
		прямокутної форми $2u^+(t) = u_0$
1	2	3
	$T = \frac{L}{Z + Z_1}$	$u_2(t) = u_0 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$
	$T = C \frac{Z \cdot Z_1}{Z + Z_1}$	$u_2(t) = u_0 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$
	$T = 2\pi\sqrt{LC}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$	$u_2(t) = u_0 \cdot (1 - \cos(\omega_0 t))$

Продовження табл. 1.1

Схема	Падаюча хвиля
	косокутної форми $2u^+(t) = \alpha \cdot t$
1	4
	$u_2(t) = \alpha \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \left(t - T + T e^{-\frac{t}{T}} \right)$
	$u_2(t) = \alpha \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \left(t - T + T e^{-\frac{t}{T}} \right)$
	$u_2(t) = \alpha \cdot \left(t - \frac{\sin(\omega_0 t)}{\omega_0} \right)$

Продовження табл. 1.1

Схема	Падаюча хвиля
	експоненціальна $2u^+(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha t} = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{T_{xe}}}$
1	5
	$u_2(t) = u_0 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{T_{xe}}{T_{xe} - T} \cdot \left(e^{\frac{t}{T_{xe}}} - e^{\frac{t}{T}} \right)$
	$u_2(t) = u_0 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot \frac{T_{xe}}{T_{xe} - T} \cdot \left(e^{\frac{t}{T_{xe}}} - e^{\frac{t}{T}} \right)$
	$u_2(t) = u_0 \cdot \frac{\omega_0^2}{\alpha^2 + \omega_0^2} \cdot \left(e^{-\alpha t} + \frac{\alpha}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 t) - \cos(\omega_0 t) \right)$

1.4 Розрахунок хвиль для вузлових точок

Вузлова точка – це точка підключення декількох ЛЕП. На рис.1.8, а – це точка x . Нехай до неї підключена підстанція, на шини якої зі сторони кожної ЛЕП набігають хвилі.

Падаюча хвиля, яка рухається по i -тій хвилі до вузла x – це $\underline{u}_{ix}$, а відображені хвилі від вузла x по i -тій хвилі – це $\underline{u}_{xi}$.

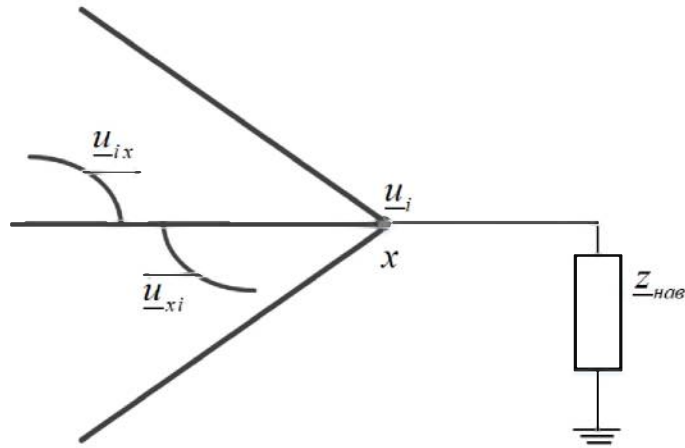


Рисунок 1.8 – Графічна інтерпретація процесів у вузловій точці

Для аналізу режимів складаю схему дослідження – рис.1.9.

В цій схемі кожна хвиля, що набігає замінюється ЕДС величиною $\underline{u}_{ix}$ і комплексним опором $\underline{z}_i$.

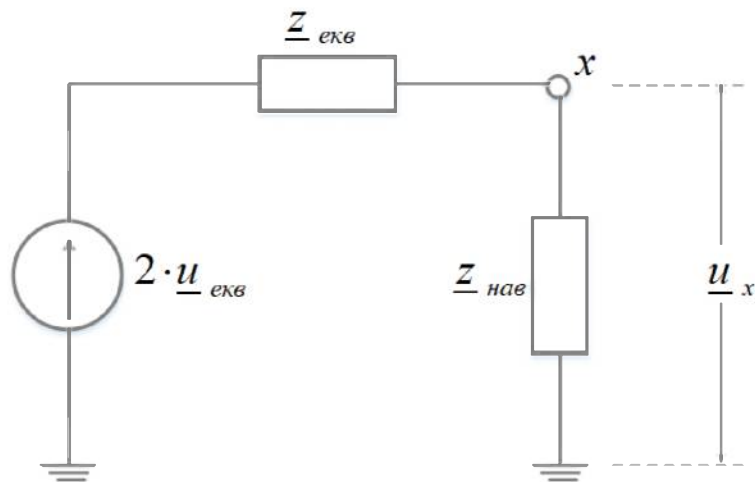


Рисунок 1.9 – Еквівалентна схема дослідження

Заломлена хвиля згідно методу накладення буде визначатися за формулою:

$$\underline{u}_x = \sum_{i=1}^n \alpha_{ix} \cdot \underline{u}_{ix} \quad (1.10)$$

де α_{ix} – коефіцієнт заломлення відповідної i -тої хвилі, за умови, що на інших ЛЕП відсутні падаючі хвилі.

В результаті всі падаючі хвилі можна замінити еквівалентною хвилею, яка визначається через комплексні опори $\underline{z}_i$:

$$\left. \begin{aligned} \underline{y}_i &= \frac{1}{\underline{z}_i} \\ \underline{u}_{екв} &= \left(\sum_{i=1}^n \underline{y}_i \right)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\underline{y}_i \cdot \underline{u}_{ix}) \\ \underline{z}_{екв} &= \left(\sum_{i=1}^n \underline{y}_i \right)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

Відображенні хвилі в i -тій ЛЕП знаходяться наступним чином:

$$\underline{u}_{xi} = \underline{u}_x - \underline{u}_{ix}$$

З урахуванням (1.11) рівняння (1.10) приймає вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{екс\ x} &= \frac{2 \cdot \underline{z}_{екв}}{\underline{z}_{екс} + \underline{z}_{екв}} \\ \underline{u}_x &= \alpha_{екс\ x} \cdot \underline{u}_{екс} \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Висновок: отримані співвідношення можна використовувати для дослідження перенапруги у вузлах підключення вузлових підстанцій.

Наступним етапом виконується аналіз багаторазових відображень.

Нехай є ділянка $n-k$ з хвильовим опором $\underline{z}$ довжиною l . Вузол n прилягає до ділянки з опором $\underline{z}_1$, а вузол k – до ділянки $\underline{z}_2$.

Падаюча хвиля $\underline{u}^+$ представляється рядом дискретних значень. Наприклад для вузла x , для k -того розрахункового шагу хвилі, вираз для розкладання хвилі, в дискретні моменти часу $t_k = k \cdot \Delta t$, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \underline{u}_x^k &= \sum_{i=1}^n \alpha_{ix} \cdot \underline{u}_{ix}^k \\ \underline{u}_{xi}^k &= \underline{u}_x^k - \underline{u}_{ix}^k \\ k &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\}$$

Для захисту від перенапруги передбачаються захисті апарати: вентильні розрядники (нелінійні опори з дуговими проміжками) або обмежувачі перенапруги (нелінійні опори). Їх робота аналізується графічно.

Зовнішня мережа представляється еквівалентним опором $\underline{z}_{екв}$, по якому падає хвиля $\underline{u}_{екв}$. Приклад графічного розрахунку – це рис. 1.9. Точка перетину двох залежностей (точка x) визначає напругу й струм в апараті захисту.

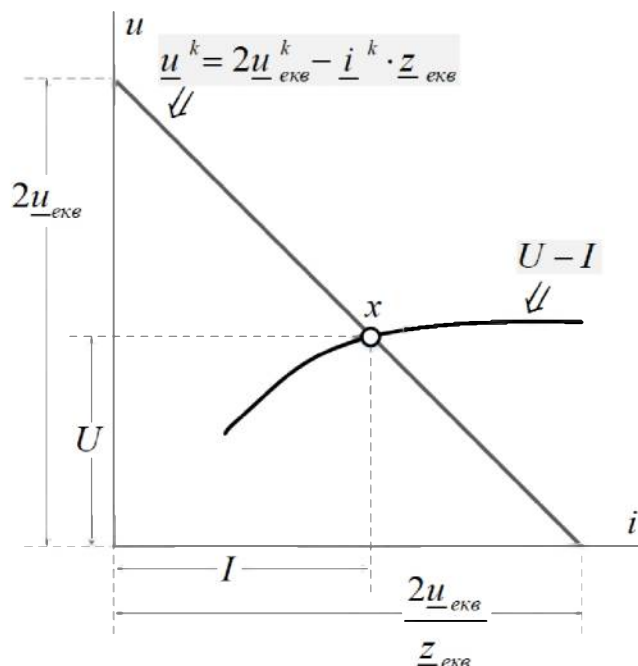


Рисунок 1.9 – Графічний розрахунок

В хвильових рівняннях (1.1) при повільній зміні напруги і струму допустимим є перехід від часткових похідних до кінцевої різниці:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \rightarrow -\Delta u = L_0 \cdot \Delta x \cdot \frac{di}{dt} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \rightarrow -\Delta i = C_0 \cdot \Delta x \cdot \frac{du}{dt} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Отримані диференціальні рівняння відповідають загальноприйнятим схемам заміщення П-подібного та Т-подібного типу (рис. 1.10, а, б).

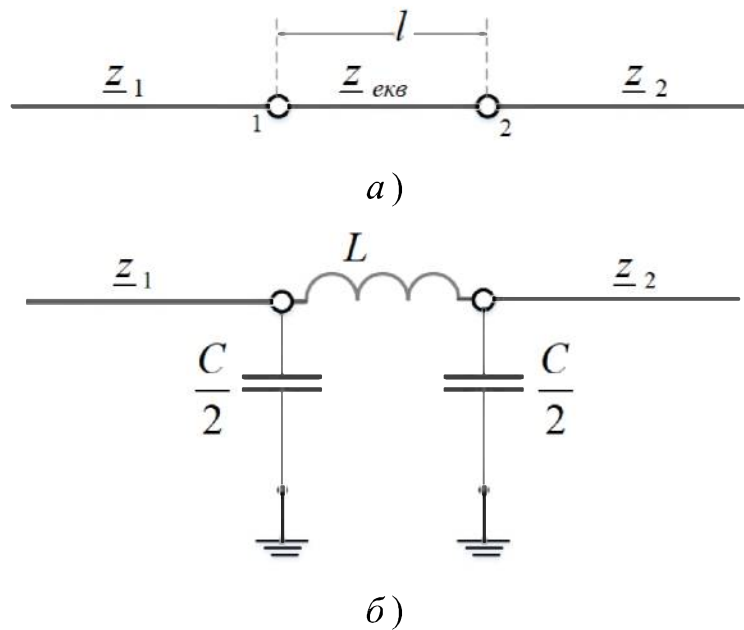


Рисунок 1.10 – Вихідна (а) і заступна (б) схеми ЛЕП

На практиці можливі два приватні випадки. У першому випадку (рис. 1.11, а):

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &\ll Z_{екв} \\ Z_2 &\ll Z_{екв} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C \approx 0$$

$$\underline{z}_{\text{ex}} \cong L = \frac{\underline{z}}{v} \cdot l$$

У другому випадку (рис. 1.11, б):

$$\left. \begin{array}{l} \underline{z}_1 \gg \underline{z} \\ \underline{z}_2 \gg \underline{z} \end{array} \right\} \Rightarrow L \approx 0$$

$$\underline{z}_{\text{ex}} \cong C = \frac{1}{\underline{z} \cdot v} \cdot l$$

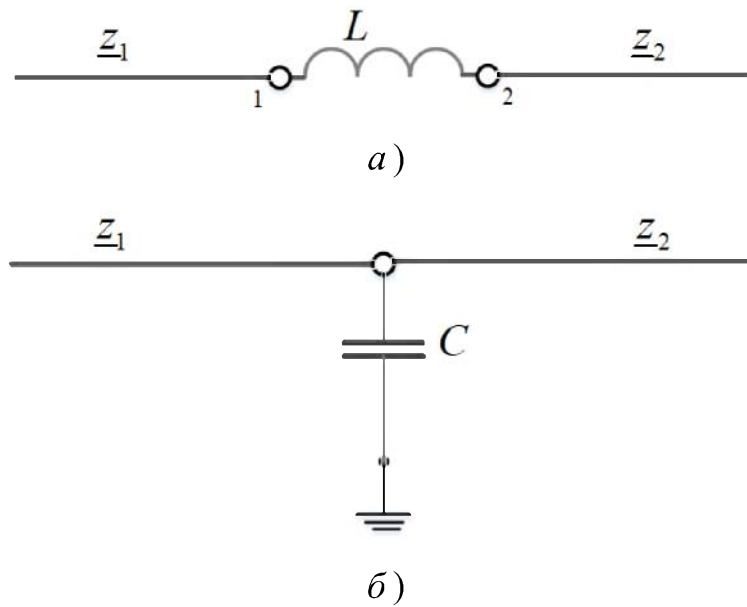


Рисунок 1.11 – Способи спрощення схем заміщення

Отримані співвідношення використовуються для розрахунку схем захисту підстанцій (рис. 1.12).

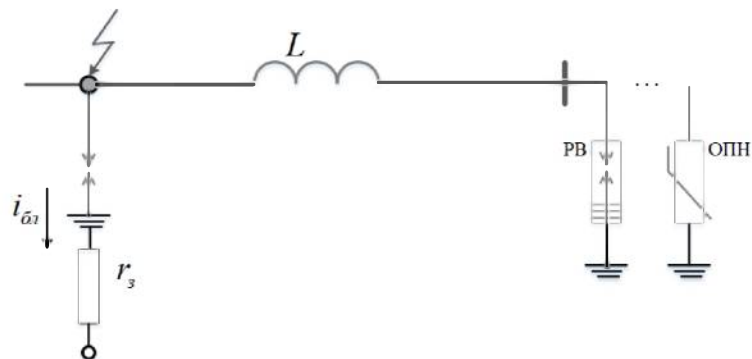


Рисунок 1.12 – Схема захисту підстанції

Вплив блискавки розпочався на відстані l від підстанції, на вході якої встановлений або вентиляний розрядник, або обмежувач перенапруги.

В цьому місці включений опір r_3 , за яким прикладена напруга:

$$U_3 = i_{\text{дт}} \cdot r_3$$

Струм блискавки:

$$i_{\text{дт}} = I_{\text{дт}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{кс}}}}$$

Після спрацьовування пристроїв захисту до вузла x буде прикладений нелінійний опір $r_{\text{нл}}$. Він спричиняє відображення хвилі зі зміною знаку. Ця хвиля в точці ушкодження знову відобразиться від опору r_3 і створить хвилю, яка за знаком буде збігатися з початковою хвилею. Через багатократні відображення величина перенапруги зростає. В даному випадку:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{z}_1 \approx r_3 \ll \underline{z}_l \approx x_l \\ \underline{z}_2 \approx r_{\text{нл}} \ll \underline{z}_l \approx x_l \end{array} \right\} \Rightarrow C \approx 0$$

$$\underline{z}_l \cong L = \frac{z}{v} \cdot l$$

Рівняння для замкненого контуру (рис. 1.13):

$$I_{\text{дт}} \cdot r_3 \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{кс}}}} = L \frac{di}{dt} + i \cdot r_{\text{нл}}$$

$$u_3 \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{кс}}}} = L \frac{di}{dt} + u_{\text{нл}}$$

(1.14)

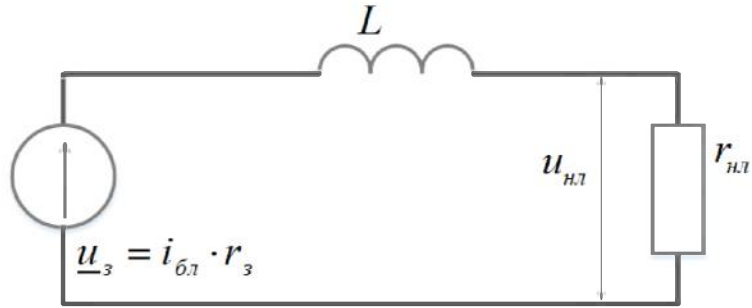


Рисунок 1.13 – Схема захисту підстанції

Для максимального значення струму:

$$\frac{di}{dt} = 0$$

$$u_3 \cdot e^{-\frac{t_M}{T_{\text{хв}}}} = u_{\text{нл}}$$

Після математичних перетворень:

$$t_M = T_{\text{хв}} \cdot \ln \frac{u_3}{u_{\text{нл}}}$$

Для рівняння (1.14)

$$\int_0^{t_M} u_3 \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{хв}}}} \cdot dt = \int_0^{t_M} L \frac{di}{dt} \cdot dt + \int_0^{t_M} u_{\text{нл}} \cdot dt \quad (1.15)$$

Перша складова:

$$\int_0^{t_M} u_3 \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{хв}}}} \cdot dt = -u_3 \cdot T_{\text{хв}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{\text{хв}}}} \Big|_0^{t_M} = u_3 \cdot T_{\text{хв}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_M}{T_{\text{хв}}}} \right)$$

друга:

$$\int_0^{t_M} L \frac{di}{dt} \cdot dt = L \cdot i \Big|_0^{t_M} = L \cdot i_M$$

третя, за умови $u_{нл} \neq f(i)$:

$$\int_0^{t_M} u_{нл} \cdot dt = u_{нл} \cdot t \Big|_0^{t_M} = u_{нл} \cdot t_M$$

Таким чином, рівняння (1.15) приймає вид:

$$u_3 \cdot T_{хс} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_M}{T_{хс}}} \right) = L \cdot i_M + u_{нл} \cdot t_M$$

Розв'язуючи систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} t_M &= T_{хс} \cdot \ln \frac{u_3}{u_{нл}} \\ u_3 \cdot e^{-\frac{t_M}{T_{хс}}} &= u_{нл} \\ u_3 \cdot T_{хс} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_M}{T_{хс}}} \right) &= L \cdot i_M + u_{нл} \cdot t_M \end{aligned} \right\}$$

знаходимо максимальний струм в пристрою захисту підстанції

$$\begin{aligned} i_M &= \frac{1}{L} \cdot \left[u_3 \cdot T_{хс} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_M}{T_{хс}}} \right) - u_{нл} \cdot T_{хс} \cdot \ln \frac{u_3}{u_{нл}} \right] = \\ &= \frac{T_{хс}}{L} \cdot \left[u_3 - \underbrace{u_3 \cdot e^{-\frac{t_M}{T_{хс}}}}_{u_{нл}} - u_{нл} \cdot \ln \frac{u_3}{u_{нл}} \right] = \\ &= \frac{T_{хс}}{L} \cdot \left[u_3 - u_{нл} \cdot \left(1 - \ln \frac{u_3}{u_{нл}} \right) \right] \end{aligned}$$

А далі за рис. 1.9 визначаються параметри (напруга, струм розрядників або ОПН) пристроїв захисту обладнання підстанції від перенапруги.

Приклад багаторазових відображень хвиль наведений в табл. 1.1-1.2, рис. 1.10 - 1.11.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані програми



Таблиця 1.2 – Розрахунок хвиль

ЛЕП 1-КЛЕП 1-2						КЛЕП-ЛЕП 2					
	u+, кВ	alfa	u, кВ	beta	u+, кВ	t, мксек	u+, кВ	alfa	u, кВ	beta	u+, кВ
	падаюча хвиля	коефіцієнт заломлення	заломлена хвиля	коефіцієнт відображення	відбита хвиля		падаюча хвиля	коефіцієнт заломлення	заломлена хвиля	коефіцієнт відображення	відбита хвиля
0	100	0,252	25,2	-0,748	-74,8	0,33	25,2	1,748	44,05	0,748	18,85
1	25,2	0,252	6,35	-0,748	-18,85	0,66	44,05	1,748	76,999	0,748	32,949
2	6,35	0,252	1,6	-0,748	-4,75	0,99	76,999	1,748	134,594	0,748	57,595
3	1,6	0,252	0,403	-0,748	-1,197	1,32	134,594	1,748	235,27	0,748	100,676
4	0,403	0,252	0,102	-0,748	-0,301	1,65	235,27	1,748	411,252	0,748	175,982
5	0,102	0,252	0,026	-0,748	-0,076	1,98	411,252	1,748	718,868	0,748	307,616

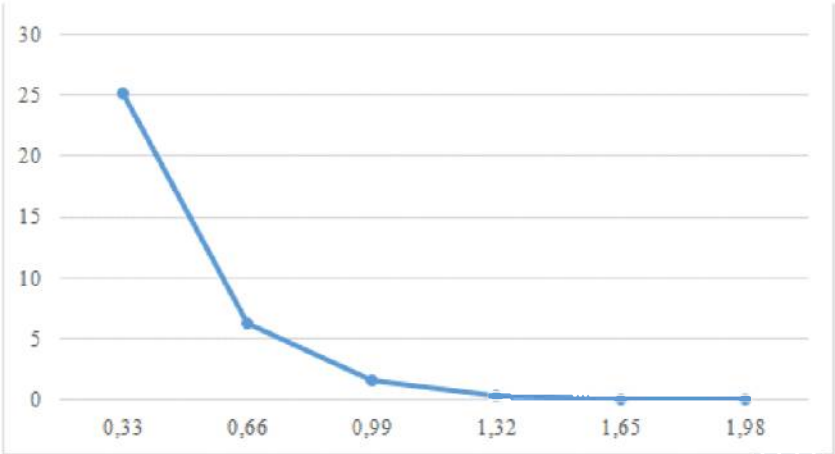


Рисунок 1.10 – Заломлена хвиля після ділянки КЛЕП

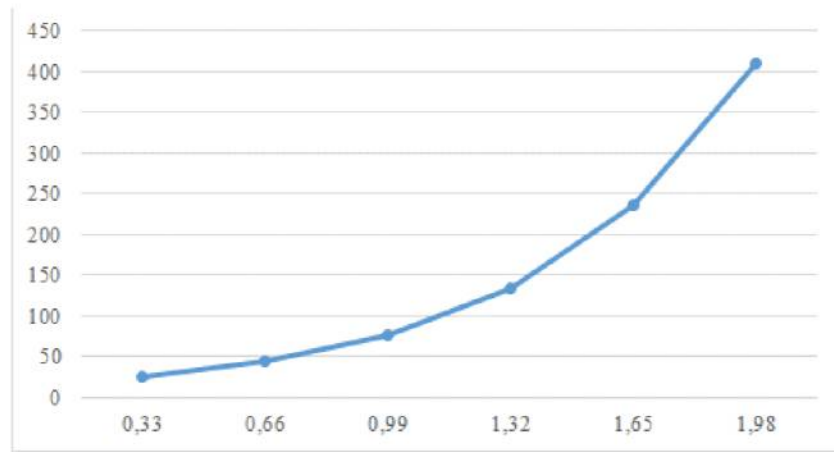


Рисунок 1.11 – Падаюча хвиля після ділянки КЛЕП

За наведеними вище виразами виконується спрощення розрахунків заломлених та відображених хвиль. Це відбувається шляхом заміни реактивних опорів та провідностей фіктивними ділянками, дія яких еквівалентна дії індуктивності L та ємності C . Завдяки наведеним вище виразам хвильовий процес можна визначити за допомогою звичайних арифметичних дій.

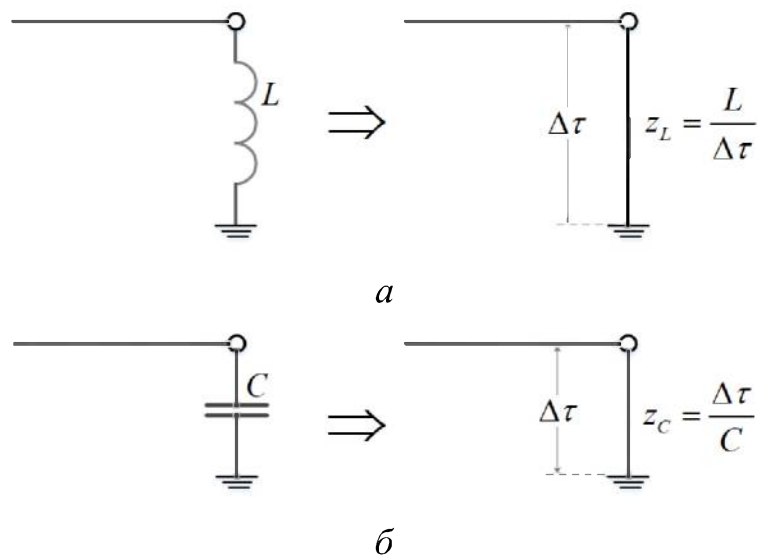


Рисунок 1.12 – До методу заміщення фіктивними ділянками

Для часу $\Delta\tau$ пробігу хвиля у прямому чи зворотному напрямках є справедливим твердження:

$$L = \underline{z} \cdot \Delta \tau$$

$$C = \frac{\Delta \tau}{\underline{z}}$$

Індуктивність, підключена до вузла схеми, замінюється фіктивною довжиною ЛЕП:

$$l \approx \Delta \tau$$

яка працює в режимі короткого замикання і має хвильовий опір $\underline{z}_L = \frac{L}{\Delta \tau}$.

При незначній величині $\Delta \tau$ ємністю можна знехтувати через її невелике значення:

$$C = \frac{\Delta \tau}{\underline{z}_L} = \frac{\Delta \tau^2}{L}$$

а індуктивність замінити хвильовим опором $\underline{z}_L$, в режимі короткого замикання.

Ємність, підключена до вузла схеми, так само замінюється фіктивною довжиною ЛЕП:

$$l \approx \Delta \tau$$

яка працює в режимі холостого ходу і має хвильовий опір $\underline{z}_C = \frac{\Delta \tau}{C}$.

При незначній величині $\Delta \tau$ індуктивністю можна знехтувати через її невелике значення:

$$L = \underline{z}_C \cdot \Delta \tau = \frac{\Delta \tau^2}{C}$$

а ємність замінити хвильовим опором $\underline{z}_C$, в режимі холостого ходу.

Під час багатократних відображень довжину фіктивних хвиль $\Delta \tau$ приймають рівною

$$\Delta \tau = \frac{\Delta t}{2}$$

1.5 Висновки за першим розділом

У розділі досліджувалися хвильові процеси в ЛЕП, що виникають при комутаціях будь-якого типу:

- включення на напругу джерела живлення (ДЖ);
- відключення від ДЖ;
- виникнення коротких замикань (КЗ);
- ураження ЛЕП ударом блискавки.

При більш детальному аналізі процесів були зроблені наступні висновки:

1) за умови однакової напруги мережі хвиля напруги буде більше в кабельній ЛЕП, ніж у повітряній, через різницю хвильового опору.

2) в режимі ХХ струм навантаження буде спадати до нуля, а *напруга на навантаженні подвоюватися*. Напруга відбитої хвилі буде зберігати знак. В режимі КЗ – напруга навантаження буде спадати до нуля, а струм на навантаженні подвоюватися. Напруга відбитої хвилі буде змінювати знак. Таким чином, при знаходженні обладнання підстанції під охоронною напругою в режимі близькому до ХХ, є вірогідність виникнення пошкодження обладнання під час атмосферних перенапруг.

3) Для підстанцій, які отримують живлення *повітряними ЛЕП*, доцільним є використання *ємності* для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі, а для підстанцій, які отримують живлення *кабельними ЛЕП*, доцільним є використання *індуктивності* для згладжування крутизни фронту заломленої хвилі.

4) Індуктивність та ємність можуть здійснити істотний вплив на амплітуду хвилі напруги за умови, що $t_{хв} \ll T$.

5) Ємність виконує захисні функції в усіх напрямках, як заломленої, так і відбитої хвилі, а індуктивність лише згладжує заломлену хвилю.

Отримані співвідношення можна використовувати для дослідження перенапруги у вузлах підключення вузлових підстанцій.

РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

2.1 Особливості багато провідних ЛЕП

В багатопровідних ЛЕП (рис. 2.1) процеси ідентичні однопровідній ЛЕП.

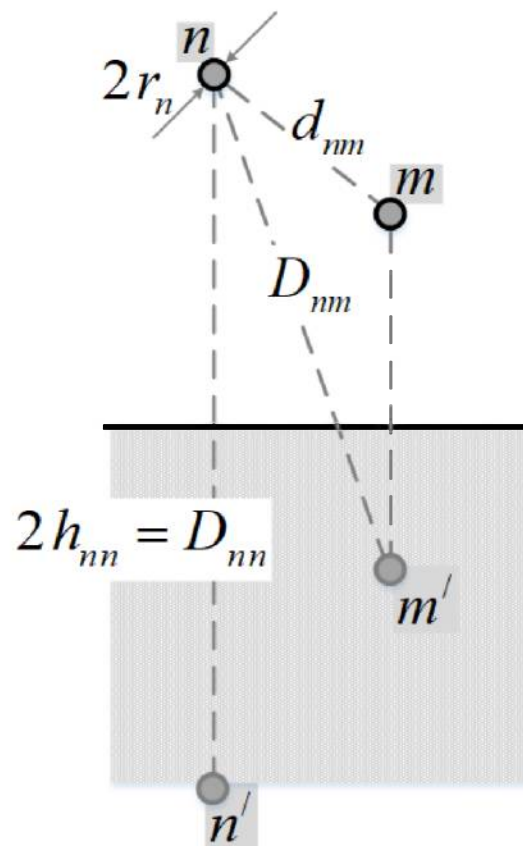


Рисунок 2.1 – Багатопровідна мережа: графічне пояснення

Зв'язок між напругою та зарядом ЛЕП є оберненим:

$$u = i \cdot z = i v \cdot \frac{z}{v} = \left\{ \begin{array}{l} z \cdot v = \frac{1}{C} \\ \frac{i}{v} = q \end{array} \right\} = q \cdot \frac{1}{C}$$

Він застосовується й для багатопровідних ЛЕП, з використанням потенціальних коефіцієнтів α , які через щільність заряду визначають напругу хвилі:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2 + \alpha_{13} \cdot q_3 + \dots \\ u_2 &= \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2 + \alpha_{23} \cdot q_3 + \dots \\ u_3 &= \alpha_{31} \cdot q_1 + \alpha_{32} \cdot q_2 + \alpha_{33} \cdot q_3 + \dots \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Використовуючи наступні перетворення

$$u = \alpha_{nm} \cdot q_n \cdot \frac{v}{v} = \left(\underbrace{q_n \cdot v}_{i_n} \right) \cdot \left(\underbrace{\frac{\alpha_{nm}}{v}}_{z_{nm}} \right) = i_n \cdot z_{nm}$$

рівняння (2.1) приймають вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= z_{11} \cdot i_1 + z_{12} \cdot i_2 + z_{13} \cdot i_3 + \dots \\ u_2 &= z_{21} \cdot i_1 + z_{22} \cdot i_2 + z_{23} \cdot i_3 + \dots \\ u_3 &= z_{31} \cdot i_1 + z_{32} \cdot i_2 + z_{33} \cdot i_3 + \dots \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

В цих рівняннях власний хвильовий опір характеризує відношення напруги, яка наводиться в n проводі, до струму в цьому проводі, який його наводить:

$$z_{nn} = 138 \lg \frac{D_m}{r_n}$$

Взаємний хвильовий опір – це відношення напруги, яка наводиться в n проводі, до струму в m проводі, який його наводить:

$$z_{nm} = 138 \lg \frac{D_{nm}}{d_{nm}}$$

Система рівнянь (2.2) дозволяє визначити струми при заданих напругах, чи навпаки, напруги при заданих струмах.

Відношення напруги u_2 , яка наводиться на ізолюваному проводі, до напруги u_1 хвилі, яка наводить, визначається через опори цих проводів:

$$k_0 = \frac{z_{12}}{z_{11}}$$

У випадку багатопровідної ЛЕП з двома грозозахисними тросами, еквівалентний хвильовий опір тросів:

$$z_{e(1)} = z_{11} + z_{12}$$

Таким чином струм у кожному тросі буде складати:

$$i = \frac{u}{z_{e(1)}} = \frac{u}{z_{11} + z_{12}}$$

Напруга, яка наводиться на одному з проводів:

$$u_3 = i_1 \cdot z_{13} + i_2 \cdot z_{23} = \frac{u}{z + z_{12}} \cdot z_{13} + \frac{u}{z + z_{12}} \cdot z_{23} = u \cdot \frac{z_{13} + z_{23}}{z_{11} + z_{12}}$$

На її базі визначається коефіцієнт зв'язку:

$$k_0 = \frac{u_3}{u} = \frac{z_{13} + z_{23}}{z_{11} + z_{12}}$$

Коронний розряд на проводах при робочій напрузі – це додаткові втрати потужності ΔS та електроенергії ΔW , а також перешкоди в роботі релейного захисту та зв'язку; при перенапрузі – це зниження амплітуди хвилі.

При виникненні корони ($U_{к.0}$) співвідношення напруги та заряду буде визначатися за виразом:

$$\left. \begin{aligned} u &> U_{к.0} \\ q &= C_0 u (1 + B u) \end{aligned} \right\}$$

А далі класичні рівняння хвильового процесу (1.1) через відмінність фізики процесу при імпульсній короні ($L_0 = const$) мають інший вигляд

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Перший множник другого рівняння наведеної вище системи рівнянь:

$$\frac{\partial q}{\partial u} = C_0 (1 + 2B u) = C_k(u)$$

Остаточно рівняння системи (2.3) приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_k(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Рішення системи (2.4) на відміну від системи (1.2) буде мати лише першу складову:

$$u = u^+ = \underbrace{F^+}_{\text{прямий хвиль}}(x - v_k \cdot t) \quad (2.5)$$

Величина швидкості розповсюдження хвилі імпульсної корони, яка входить в рівняння (1.2) визначається наступним чином:

$$v_k = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0(u)}}$$

Роздивимося алгоритм розрахунку фронту хвилі.

1) визначаємо коефіцієнт $B(d_{np})$, який має графічну залежність від діаметру – рис.2.2.

Цю залежність апроксимується й аналітично. Найбільш точна характеристика відповідає функції виду:

$$B(d_{np}) = a \cdot (d_{np})^b$$

Для заданої характеристики: $a = 0,704$, $b = -0,516$.

2) визначаємо швидкість розповсюдження хвилі для ПЛЕП:

$$v_k = \frac{c}{\sqrt{1 + 2Bu}}$$

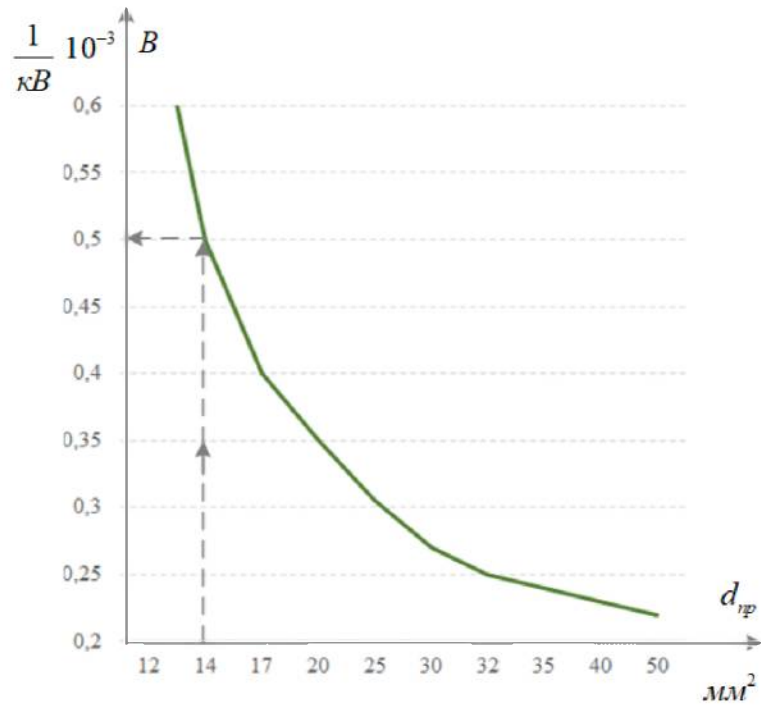


Рисунок 2.2 – Залежність $B(d_{np})$

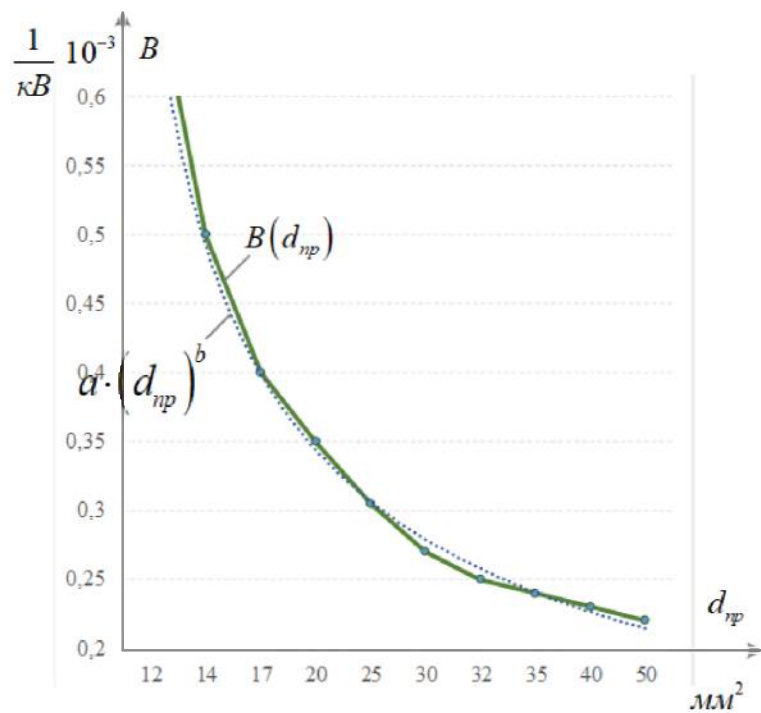


Рисунок 2.3 – Залежності $B(d_{np})$, $a \cdot (d_{np})^b$

3) визначаємо час відставання кривої напруги (рис. 2.4):

$$\Delta t(u) = \frac{l}{v_k} - \frac{l}{c} = \frac{l}{c} \cdot \left[\sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u} - 1 \right] \approx \frac{l}{c} \cdot B \cdot u$$

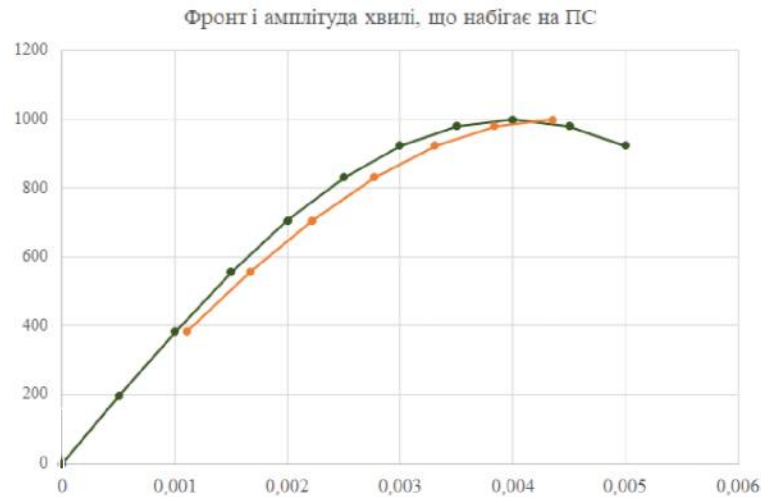


Рисунок 2.4 – Графічна інтерпретація

4) критерій закінчення розрахунків – точка перетину кривих напруги.

5) визначаємо вплив корони на хвильовий опір ЛЕП, який з величини $\underline{z}_0$ зміниться до величини $\underline{z}_k$:

$$d\underline{i} = \frac{1}{\underline{z}_k} d\underline{u}$$

$$\underline{z}_k = \sqrt{\frac{L}{C_k}} = \frac{\underline{z}_0}{\sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u}}$$

$$\underline{i} = \frac{1}{\underline{z}_0} \int_0^u \sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u} du$$

Так як

$$\frac{i}{\varepsilon_k} = \frac{1}{\varepsilon_k} u$$

то

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 \left[\frac{3 \cdot B \cdot u}{(1 + 2 \cdot B \cdot u)^{3/2} - 1} \right] \approx \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1 + B \cdot u}}$$

Висновок: імпульсна корона знижує хвильовий опір.

Такий самий ефект виконується для коефіцієнт зв'язку

$$k_k = k_0 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_k} \approx k_0 \cdot (1 + B \cdot u)$$

2.2 Дослідження перенапруги в обмотках трансформатора

Схема заміщення, яка використовується для досліджень, показана на рис. 2.5.

На схемі прийняті наступні позначення: ΔC_{i3} – ємність i -того елемента відносно землі, ΔC_{ij} – ємність i -того елемента відносно j -того елемента, ΔL – самоіндукція і взаємоіндукція між елементами обмотки, Δr – елемент, який характеризує падіння напруги.

Всі ці параметри дозволяють визначити характеристики на одну одиницю довжини:

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \Delta L \cdot n \\ C_{i3_0} &= \Delta C_{i3} \cdot n \\ C_{ij_0} &= \frac{\Delta C_{ij}}{n} \end{aligned} \right\}$$

Загальна характеристика обмотки довжиною l :

$$\left. \begin{aligned} L_{\Sigma} &= L_0 \cdot l \\ C_{i3\Sigma} &= C_{i30} \cdot l \\ C_{ij\Sigma} &= \frac{C_{ij0}}{l} \end{aligned} \right\}$$

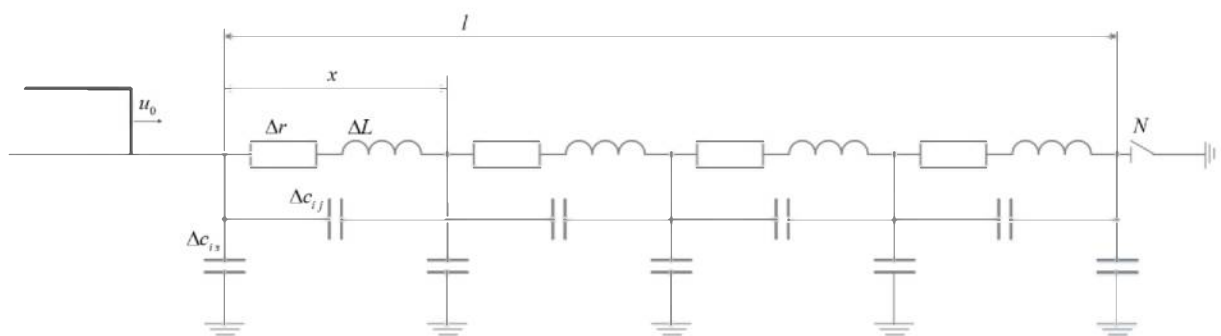


Рисунок 2.5 – Еквівалентна схема для трансформаторів

Вид схеми визначається частотою сигналу:

$$f = 0 \Rightarrow \underline{Z} \approx r$$

$$f \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{Z} \approx L$$

$$f = \infty \Rightarrow \underline{Z} \approx C$$

Тому, якщо для початкового моменту $t_0 = 0$ частота сигналу наближається до нескінченності, то розподіл сигналу визначається двома величинами C_{i3} і C_{ij} (рис. 2.6).

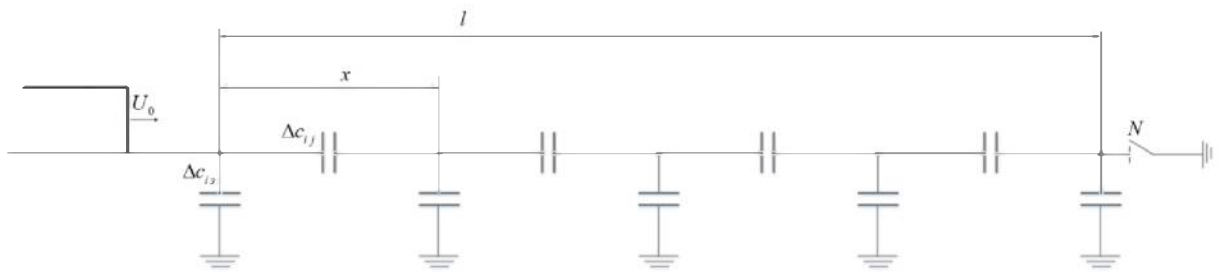


Рисунок 2.6 – Початковий розподіл напруги

Заряд міжвиткової ємності визначається наступним чином:

$$q = \frac{C_{ij0}}{dx} dU \quad (2.6)$$

а заряд ємності відносно землі, як показано нижче:

$$dq = U \cdot C_{i30} dx \quad (2.7)$$

Диференціюємо рівняння (2.6) за довжиною елементу, який розглядаємо:

$$\frac{dq}{dx} = C_{ij0} \frac{d^2 U}{dx^2}$$

Враховуючи рівняння (2.7):

$$\frac{U \cdot C_{i30} dx}{dx} = C_{ij0} \frac{d^2 U}{dx^2}$$

$$\frac{U \cdot C_{i30}}{C_{ij0}} = \frac{d^2 U}{dx^2}$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - U \cdot \frac{C_{i30}}{C_{ij0}} = 0$$

Отже

$$\left. \begin{aligned} U &= C_1 \cdot e^{\alpha_1 x} + C_2 \cdot e^{-\alpha_2 x} \\ \alpha_{1,2} &= \sqrt{\frac{C_{i30}}{C_{ij0}}} \end{aligned} \right\}$$

Постійні коефіцієнти, як прийнято в теорії диференціальних розрахунків, визначаються для початкових умов:

$$\left. \begin{aligned} x &= 0 \\ U_0 &= C_1 \cdot e^{\alpha_1 \cdot 0} + C_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot 0} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_0 = C_1 + C_2$$

$$\left. \begin{aligned} x &= l \\ U_N &= C_1 \cdot e^{\alpha_1 \cdot l} + C_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot l} \end{aligned} \right\}$$

Величина U_N визначається режимом роботи нейтралі. Для $U_{ном} \geq 110 \text{ кВ}$, де глухо або ефективно заземлена нейтраль $U_N = 0$; для $U_{ном} = 6 \div 35 \text{ кВ}$, де ізольована нейтраль і симетричний режим роботи $U_N \approx 0$.

Якщо подивимося на останнє рівняння, то умова для напруги нейтралі виконується при $C_1 = 0$. Отже отримуємо нову систему рівнянь:

$$U \approx C_2 \cdot e^{-\alpha_2 x} = U_0 \cdot e^{-\alpha x} = U_0 \cdot e^{-\alpha l \frac{x}{l}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_{l30}}{C_{lj0}}}$$

З неї дуже добре видно, що коефіцієнт α найбільше впливає на швидкість і крутизну падіння напруги.

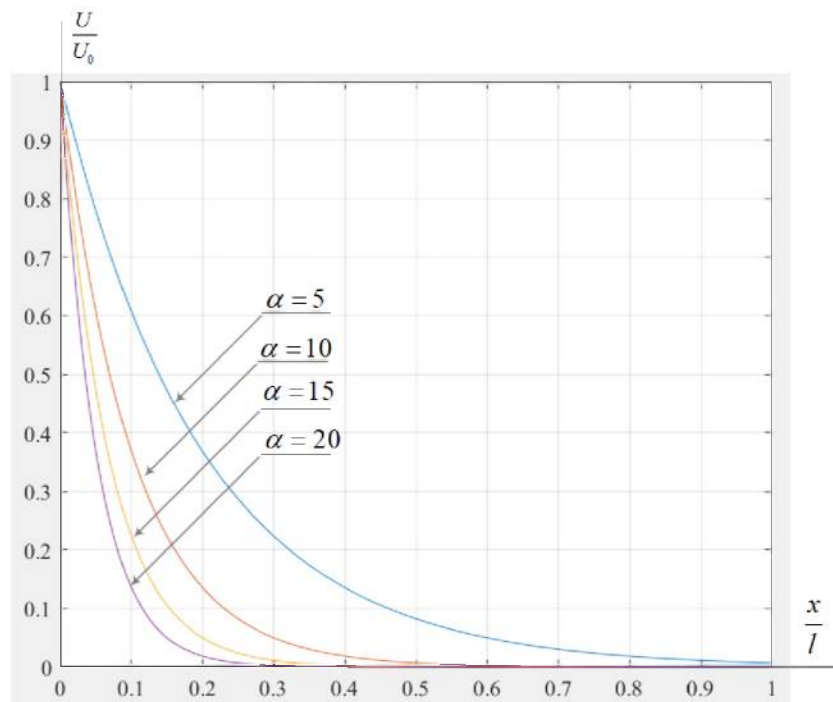


Рисунок 2.7 – Залежності $\Delta U = f\left(\frac{x}{l}\right)$

Висновок: найбільше значення зміни напруги відповідає початку обмотки трансформатора. На практиці це призводить до відповідного посилення ізоляції витків на початку обмотки трансформатора.

Але на цьому перенапруги в обмотках трансформатора не обмежуються. Через значну індуктивність в трансформаторі виникають резонансні перенапруги, які можуть порушити ізоляцію і в середині обмотки. Отже на практиці не лише на початку, а й впродовж всієї обмотки ізоляція посилюється.

Розглядається початкова ємність трансформатора:

$$C_{\text{ex}} = \frac{q_{x \rightarrow 0}}{U_0}$$

$$C_{\text{ex}} = \frac{\frac{C_{ij0}}{dx} dU}{U_0} = \frac{\frac{C_{ij0}}{dx} d(U_0 \cdot e^{\alpha x})}{U_0} = \frac{C_{ij0} \cdot U_0 \cdot \alpha}{U_0} = \sqrt{C_{ij0} \cdot C_{i30}}$$

Далі виконуючи спрощення, отримуємо

$$C_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{C_{ij0}}{l} \cdot C_{i30} \cdot l} = \sqrt{C_{ij\Sigma} \cdot C_{i3\Sigma}}$$

Висновок: величина вхідної ємності C_{ex} не залежить від режиму роботи нейтралі. Вона залежить від конструкції трансформатора і таких його параметрів, як номінальна потужність $S_{\text{ном}}$ і напруга $U_{\text{ном}}$.

Через індуктивність і ємність в обмотках трансформатора виникають коливальні процеси заряду-розряду ємності, які визначають кількість k гармонік в кривій напруги. Ця складова напруги є вільною, або так званою, аперіодичною $u_{\text{an}}(t)$. Вона характеризує хвилі перенапруги. Її складові мають амплітуду, яка обернено пропорційна номеру гармоніки, і частоту, яка прямо пропорційна номеру гармоніки

Для заземленої нейтралі:

$$u_{\text{an}}(t) = \sum_{k=1}^n u_{\text{an}_k} \cdot \sin(\omega_k t)$$

$$u_{an_k} = \frac{U_0}{k\pi \left(1 + \left(\frac{k\pi}{\alpha l} \right)^2 \right)}$$

Підсумовування окремих складових дає можливість визначити максимальну перенапругу по довжині всієї обмотки.

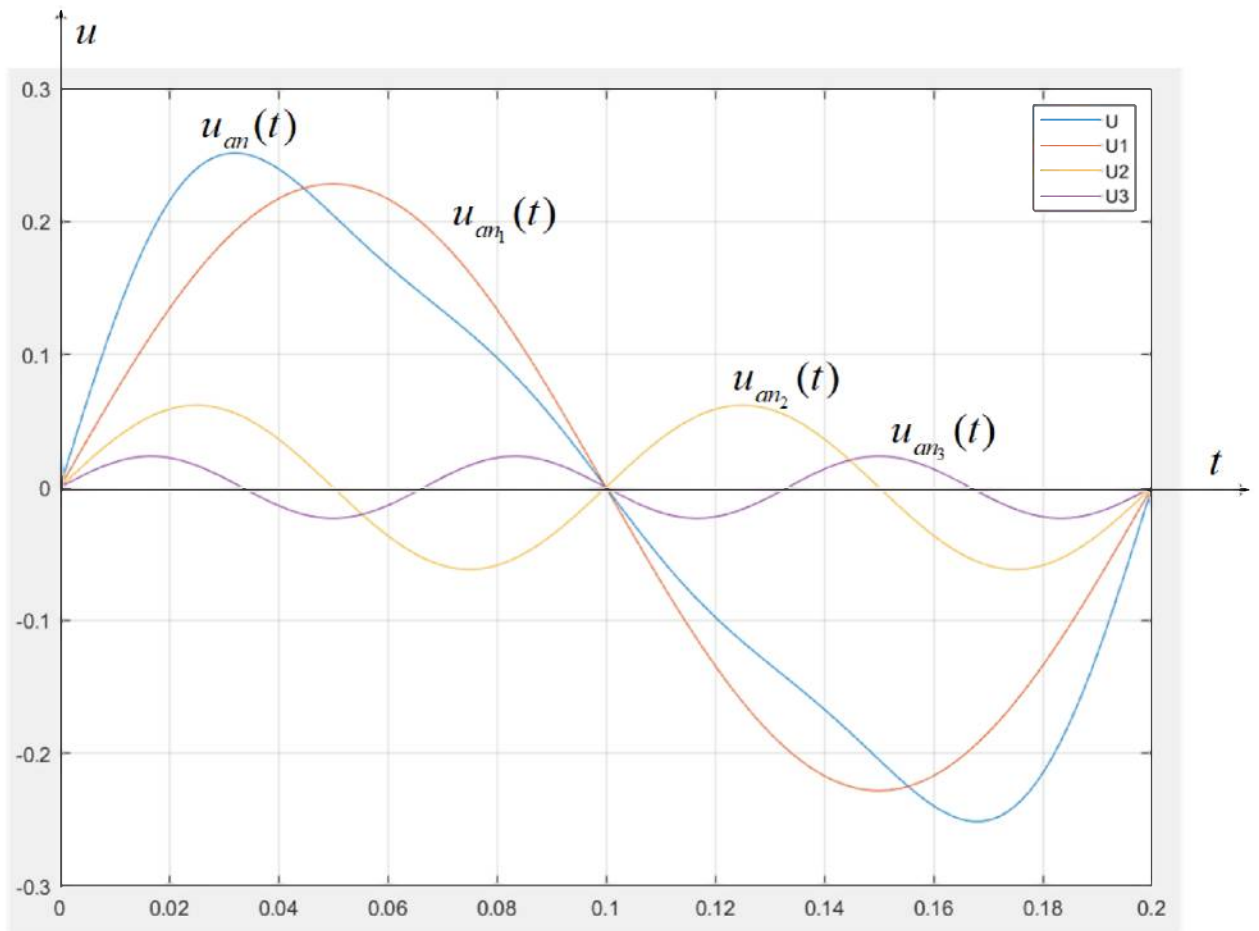


Рисунок 2.8 – До визначення складових аперіодичної напруги

Для ізольованої нейтралі:

$$u_{an_k} = \frac{4U_0}{(2k-1)\pi \left[1 + \left(\frac{(2k-1)\pi}{\alpha l} \right)^2 \right]}$$

Висновки: для режиму заземленої нейтралі найбільша величина перенапруги виникає на відстані 20-30 % від початку обмотки. Ця величина може досягати $1,3 U_0$.

Шляхи зниження ризику руйнування ізоляції трансформаторів:
по-перше, посилення ізоляції при проектуванні трансформаторів;
по-друге, обмеження амплітуди хвилі напруги, яка падає на підстанцію;
і звісно ж, обмеження швидкості наростання хвилі напруги.

2.3 Висновки за другим розділом

У розділі досліджувалися хвильові процеси в трансформаторах.

Були отримані наступні висновки

- імпульсна корона знижує хвильовий опір.
- найбільше значення зміни напруги відповідає початку обмотки трансформатора. На практиці це призводить до відповідного посилення ізоляції витків на початку обмотки трансформатора.
- величина вхідної ємності $C_{вх}$ не залежить від режиму роботи нейтралі. Вона залежить від конструкції трансформатора і таких його параметрів, як номінальна потужність $S_{ном}$ і напруга $U_{ном}$.
- для режиму заземленої нейтралі найбільша величина перенапруги виникає на відстані 20-30 % від початку обмотки. Ця величина може досягати $1,3 U_0$.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПЕРЕНАПРУГИ ДЛЯ ПІДСТАНЦІЇ 750КВ

В нашому регіоні знаходиться в експлуатації ПС Донбаська-750.

В 2018 році 31 березня в обмотці силового автотрансформатора ПС Донбаська-750 виникло внутрішнє ушкодження, через яке спрацював релейний захист. За сигналом релейного захисту автотрансформатор (четвертий) було відключено від мережі.

Згідно з загально відомими даними термін експлуатації АТ наблизився на той момент до 45 років.

За інвестиційною програмою підприємства Укренерго, якому належить ця підстанція була виконана:

- по-перше, заміна автотрансформатора;
- по-друге, заміна обмежувачів перенапруги 750 кВ для АТ;
- далі, заміна реакторів приєднання Південнодонбаська-750;
- і останнє, заміна елегазових трансформаторів струму 750 кВ.

Час реконструкції зайняв більше двох місяців. Реконструкція була складна й витратна, але вона була в край потрібна, так як весь цей час обмежувалася потужність передачі й надійність роботи. Це вплинуло також на роботу Вуглегорської ТЕС та Запорізької АЕС.

3.1 Моделювання ділянки мережі

Вихідні данні для моделювання були визначенні за допомогою сайту Укренерго.

Розподільчий устрій 750 кВ – це схема наведена на рис. 3.1.

У цього РУ шість приєднань (дві ЛЕП і чотири автотрансформатора):

- ЛЕП до РУ Запорізька 750 кВ;
- ЛЕП до РУ Южнодонбаська 750 кВ;
- АТ 1 і АТ 2 типу 3 АОДЦТН-417000/750/500;
- АТ 3 і АТ 4 типу 3 АОДЦТН-333000/750/330.

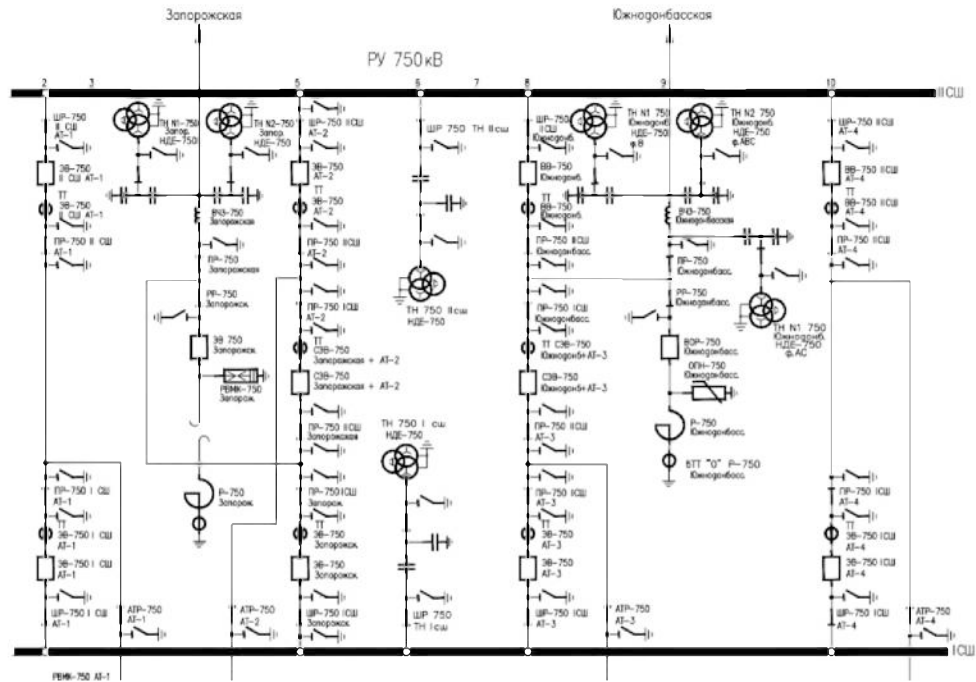


Рисунок 3.1 – Розподільний устрій для 750 кВ

Розподільний устрій 500 кВ – це схема наведена на рис. 3.2.

У цього РУ чотири приєднання (дві ЛЕП і дваавтотрансформатора):

- ЛЕП до РУ Новодонбаська 500 кВ;
- ЛЕП до РУ Донська 500 кВ;
- АТ 1 і АТ 2 типу 3 АОДЦТН-417000/750/500.

Розподільний устрій 330 кВ – це схема наведена на рис. 3.3.

У цього РУ шість приєднань (чотири ЛЕП і два автотрансформатора):

- ЛЕП до Слов'янська ТЕС 330 кВ;
- ЛЕП до Углегоська №1, №2 і №3 330 кВ;
- АТ 3 і АТ 4 типу 3 АОДЦТН-333000/750/330.

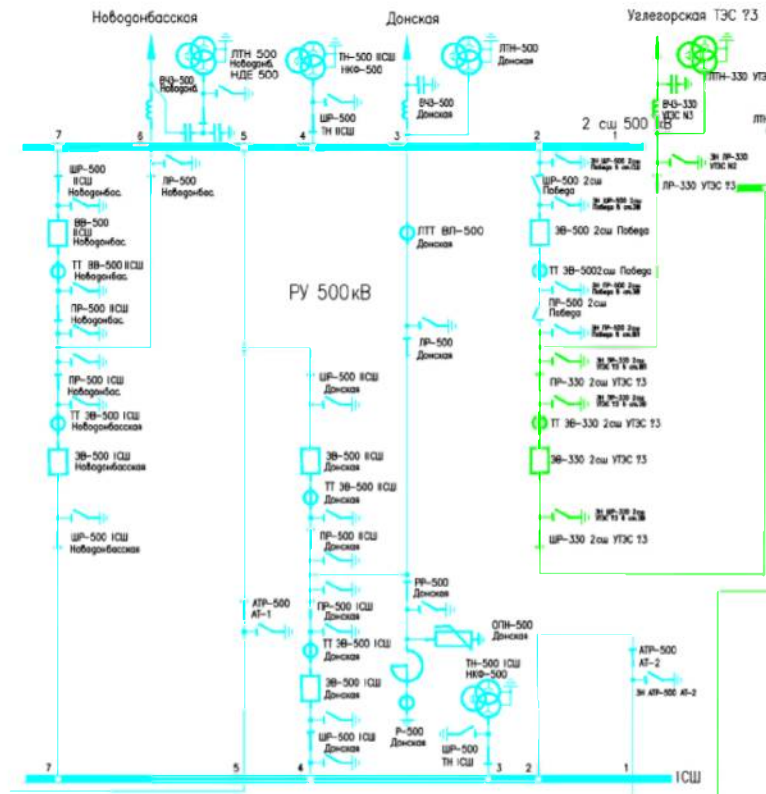


Рисунок 3.2 – Розподільчий устрій для 500 кВ

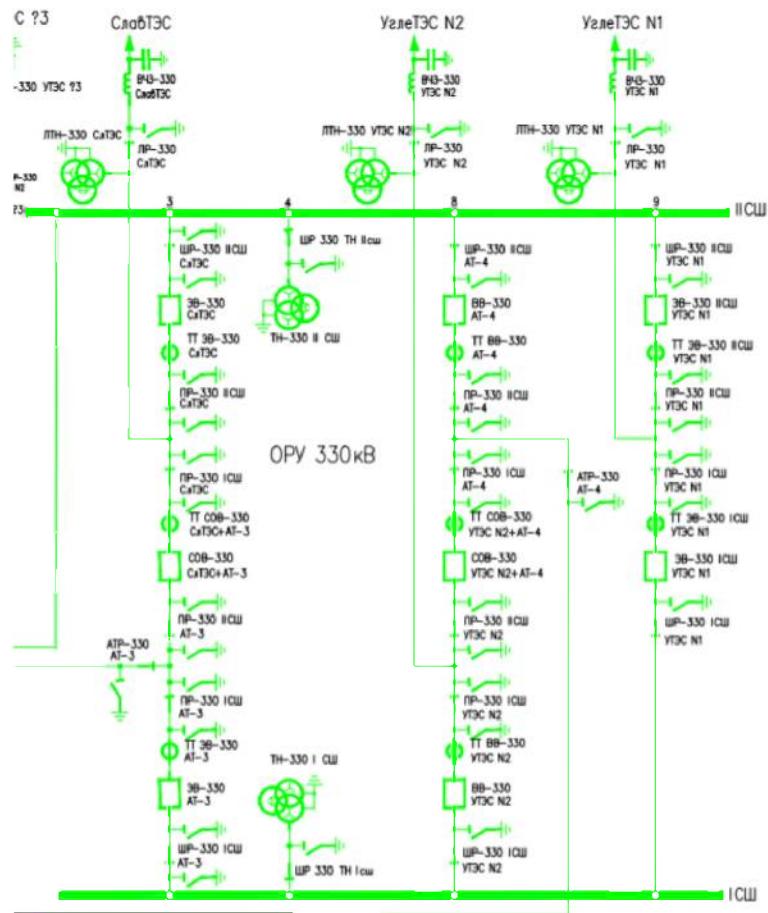


Рисунок 3.3 – Розподільчий устрій для 330 кВ

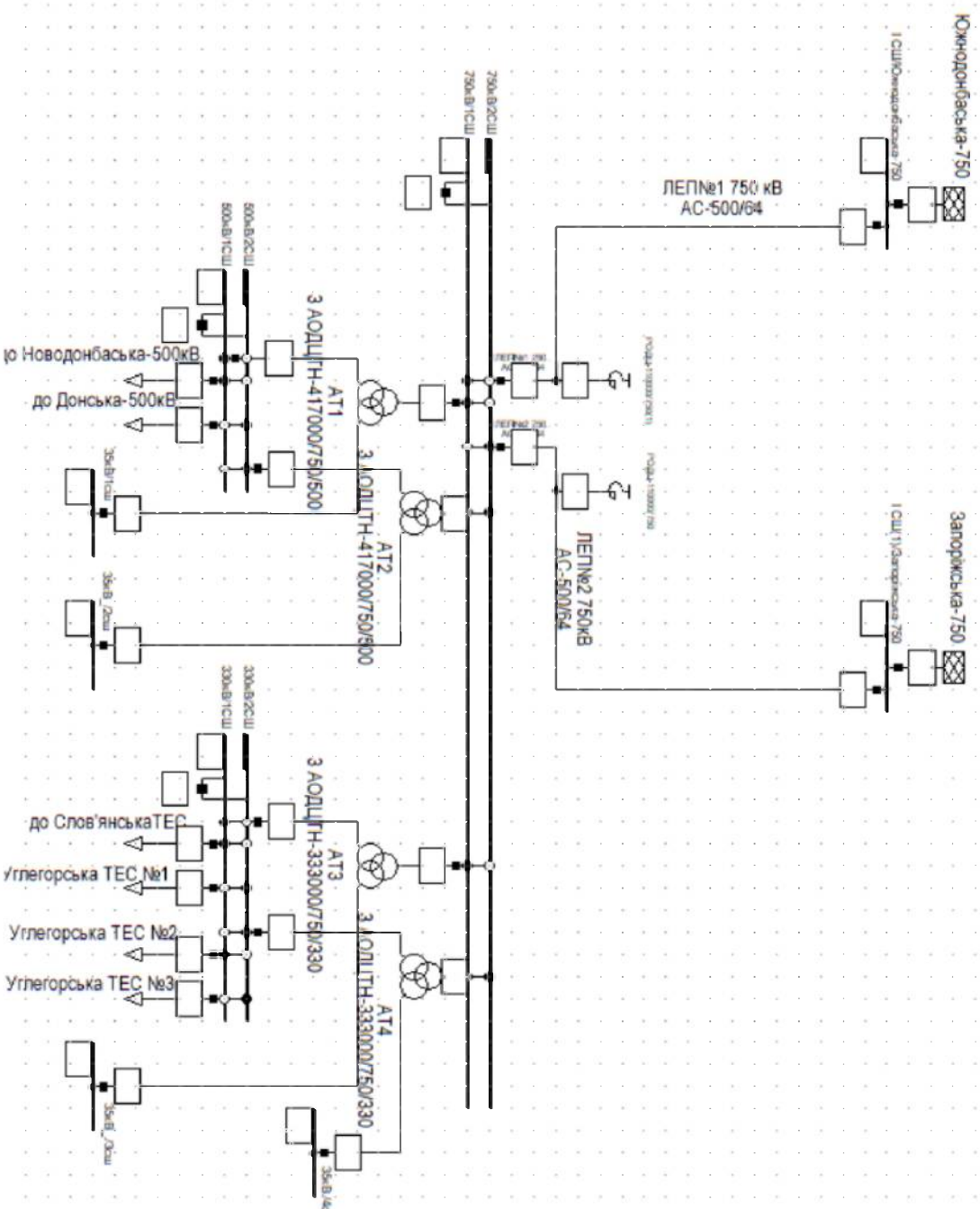


Рисунок 3.4 – Модель для досліджень

Зв'язок з іншими джерелами напругою 750 кВ показаний на рис.3.5. Як системи, вони мають можливість регулювати напругу в допустимому діапазоні (рис.3.5, б).

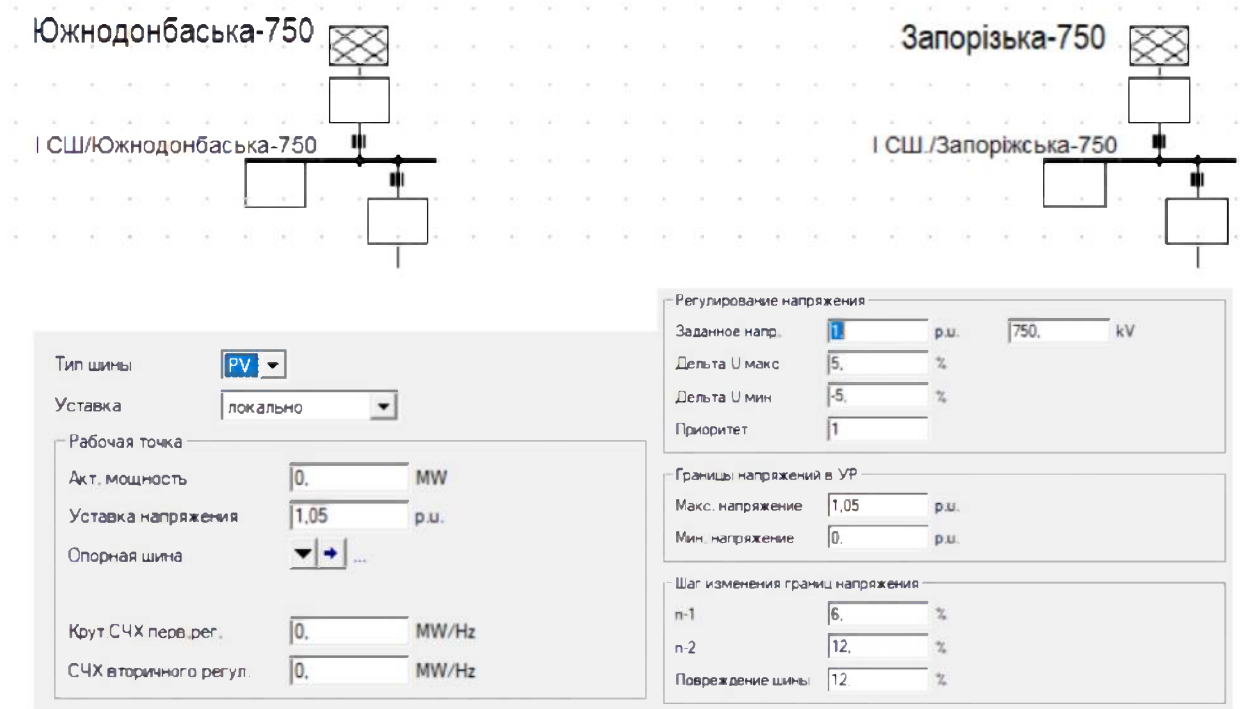


Рисунок 3.5 – Для Южнодонбаська-750 і Запорізьська-750

Для ЛЕП, які забезпечують зв'язок між Южнодонбаська-750 і Запорізька-750 (рис. 3.6):

$$r_{пр.екв} = \sqrt[n]{r_{пр} \cdot a^{n-1}} = \sqrt[4]{\frac{27,7}{2} \cdot 400^{4-1}} = 172,5 \text{ мм}$$

$$r_0 = \frac{1}{F \cdot n \cdot \gamma_{al}} = \frac{1}{400 \cdot 4 \cdot 31,7 \cdot 10^{-3}} = 0,020 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$x_0 = 0,144 \cdot \log \frac{D_{cp}}{r_{пр.екв}} + 0,016 \cdot \frac{\mu}{n} = 0,144 \cdot \log \frac{9000}{172,5 \cdot 10^{-3}} + 0,016 \cdot \frac{1}{4} = 0,683 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{D_{cp}}{r_{пр.екв}}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{9000}{172,5 \cdot 10^{-3}}} = 1,607 \cdot 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}$$

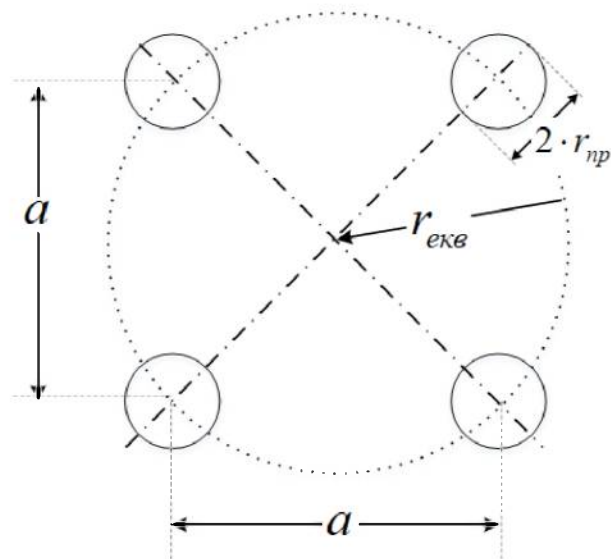


Рисунок 3.6 – Розщеплення на 4 проводу

Для 4хАС-400/64: діаметр проводу – $d_{пр} = 27,7 \text{ мм}$, перетин алюмінієвої частини – $F_{ал} = 390 \text{ мм}^2$, сталюї – $F_{ст} = 63,5 \text{ мм}^2$; допустимий струм – $I_{дон} = 860 \text{ А}$. Траса ЛЕП №1 750 кВ і ЛЕП №2 750 кВ – це рис. 3.7.

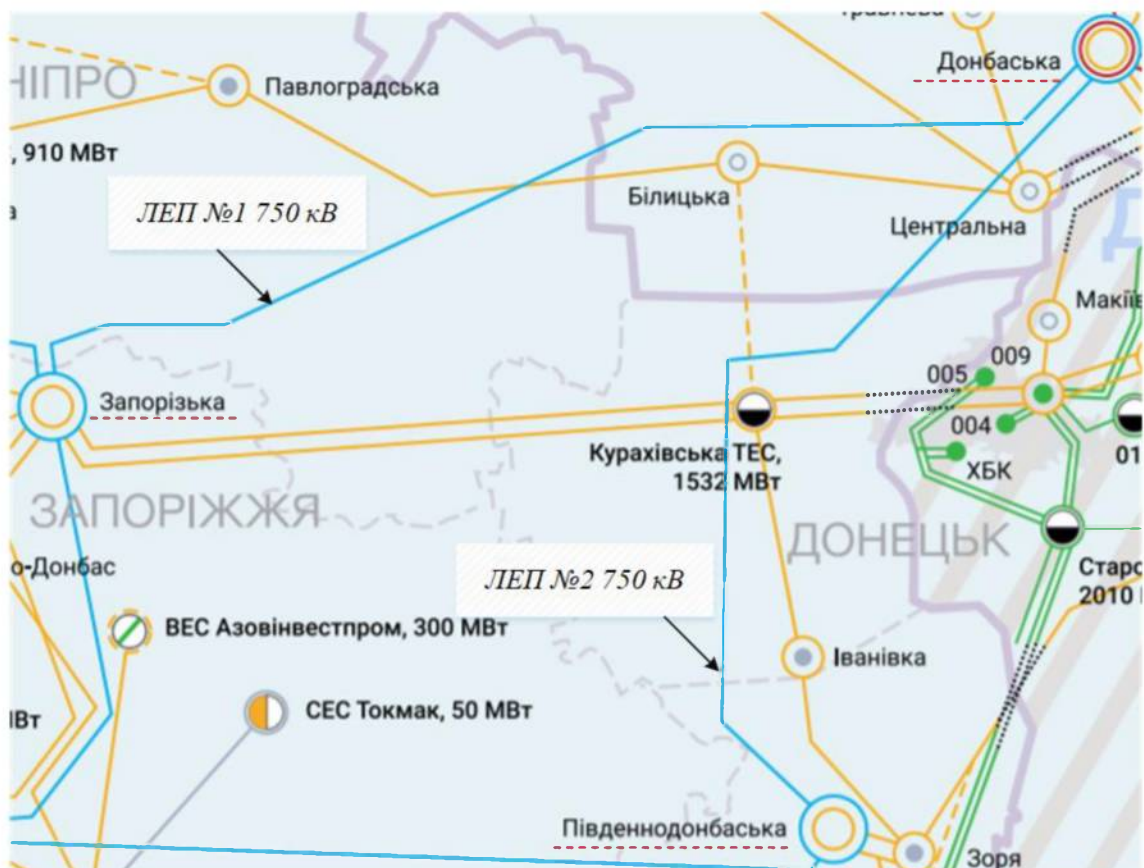


Рисунок 3.7 – Конфігурація мережі

Далі для АТ1, АТ2 (рис. 3.8) типу 3 АОДЦТН-417000/750/500:

$$S_{ном} = 417 \text{ MVA}, \quad U_{в.ном} = \frac{750}{\sqrt{3}} \text{ кВ}, \quad U_{с.ном} = \frac{500}{\sqrt{3}} \text{ кВ}, \quad U_{н.ном} = \frac{35}{\sqrt{3}} \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\kappa} = 670 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{\text{сх}} = 125 \text{ кВт}, \quad I_x = 0,15 \%, \quad u_{\kappa в-с} = 11,5 \%, \quad u_{\kappa в-н} = 81 \%,$$

$$u_{\kappa с-н} = 68 \%.$$

Имя: 3 АОДЦТН-417000/750/500

Ном. мощность		Ном. напряжение	
Сторона ВН	417 MVA	Сторона ВН	750 kV
Сторона СН	417 MVA	Сторона СН	500 kV
Сторона НН	208,5 MVA	Сторона НН	35 kV

Векторная группа

Сторона ВН	YN	Фаз. сдвиг	0, *30deg
Сторона СН	YN	Фаз. сдвиг	0, *30deg
Сторона НН	D	Фаз. сдвиг	11, *30deg

Обозначение YN0yn0d11

Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям
Например, $u_{\kappa(ВН-СН)}$ относится к мин. $S_{\kappa(ВН)}$ и $S_{\kappa(СН)}$

Полное сопротивление прямой последовательности

Напряжение КЗ u_{κ}		Потери в меди	
ВН-СН	11,5 %	ВН-СН	670 kW
СН-НН	68, %	СН-НН	670 kW
НН-ВН	81, %	НН-ВН	1005 kW

Ответ. стороны ВН

Добав. напр. на отв.	0, %
Фазовый сдвиг напр.	0, deg
Нейтр. полож.	0
Мин. положение	0
Макс. положение	0

Полн. сопр. намагничивания

Положение	Нейтраль
Ток ХХ	0,15 %
Потери холостого	125 kW

Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.

Положение	Нейтраль
Ток ХХ	0, %
Действ. R/X	0,

Ответ. стороны СН

Добав. напр. на отв.	0, %
Фазовый сдвиг напр.	0, deg
Нейтр. полож.	0
Мин. положение	0
Макс. положение	0

Рисунок 3.8 – Для 3 АОДЦТН-417000/750/500

Далі для АТ1, АТ2 (рис. 3.9) типу 3 АОДЦТН-333000/750/500:

$$S_{ном} = 333 \text{ MVA}, \quad U_{в.ном} = \frac{750}{\sqrt{3}} \text{ кВ}, \quad U_{с.ном} = \frac{330}{\sqrt{3}} \text{ кВ}, \quad U_{н.ном} = \frac{35}{\sqrt{3}} \text{ кВ},$$

$$\Delta P_{\kappa} = 580 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{xx} = 217 \text{ кВт}, \quad I_x = 0,35 \%, \quad u_{\kappa в-с} = 13 \%, \quad u_{\kappa в-н} = 31 \%,$$

$$u_{\kappa с-н} = 17 \%.$$

Имя 3 АОДЦТН-333000/750/330

Ном. мощность		Ном. напряжение	
Сторона ВН	333. MVA	Сторона ВН	750. кВ
Сторона СН	333. MVA	Сторона СН	330. кВ
Сторона НН	166,5 MVA	Сторона НН	35. кВ

Векторная группа

Сторона ВН	YN	Фаз. сдвиг	0. *30deg
Сторона СН	YN	Фаз. сдвиг	0. *30deg
Сторона НН	D	Фаз. сдвиг	11. *30deg

Обозначение YN0yn0d11

Совет: напряжения КЗ относятся к соответствующим мин. ном. мощностям
Например, $u_{\kappa(ВН-СН)}$ относится к мин. $S_{\kappa(ВН)}$ и $S_{\kappa(СН)}$

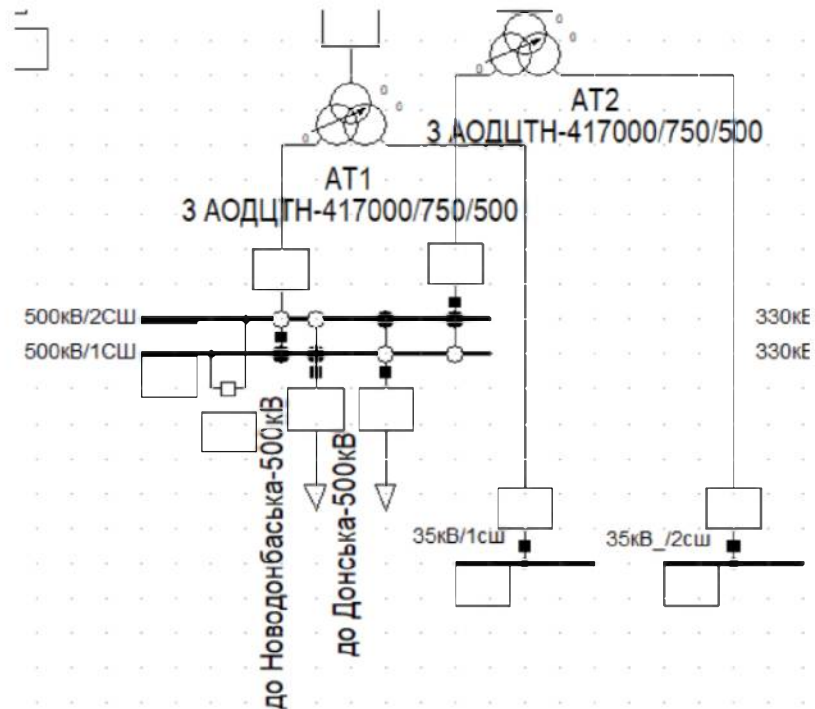
Полное сопротивление прямой последовательности

Напряжение КЗ u_{κ}		Потери в меди	
ВН-СН	10. %	ВН-СН	580. кВт
СН-НН	28. %	СН-НН	580. кВт
НН-ВН	17. %	НН-ВН	870. кВт

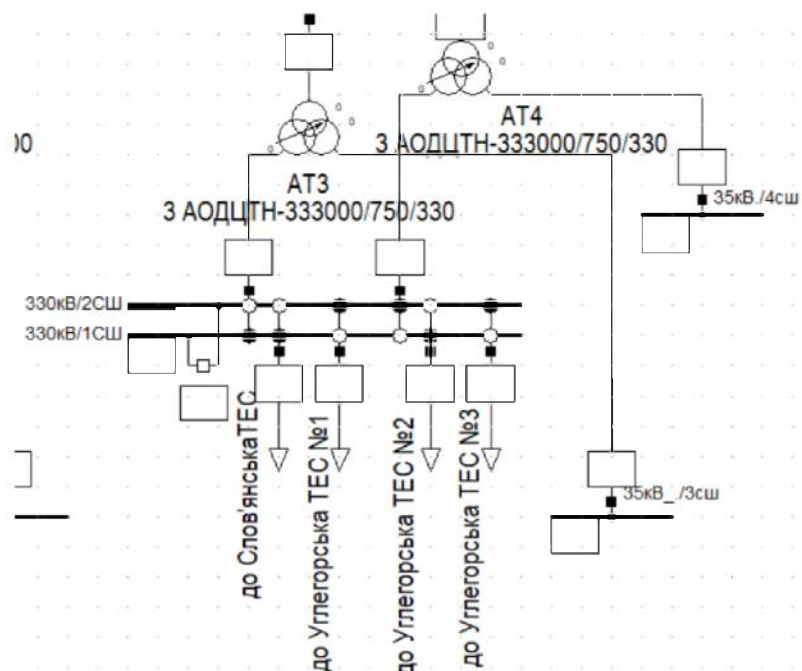
Отв. стороны ВН		Полн. сопр. намагничивания	
Добав. напр. на отв.	0. %	Положение	Нейтраль
Фазовый сдвиг напр.	0. deg	Ток XX	0,35 %
Нейтр. полож.	0	Потери холостого	217. кВт
Мин. положение	0	Реакт. сопр. намагничивания нул. посл.	
Макс. положение	0	Положение	Нейтраль
Отв. стороны СН		Ток XX	0. %
Добав. напр. на отв.	0. %	Действ. R/X	0.
Фазовый сдвиг напр.	0. deg		
Нейтр. полож.	0		
Мин. положение	0		
Макс. положение	0		

Рисунок 3.9 – Для 3 АОДЦТН-33000/750/330

За оперативною схемою АТ1 і АТ2 (рис. 3.10, а) забезпечують зв'язок з приєднаннями 500 кВ Новодонбаська-500 кВ і Донська-500 кВ, а АТ3 і АТ4 (рис. 3.10, б) – з приєднаннями 330 кВ Слов'янська ТЕС і Угледгорська ТЕС №1, №2, №3.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Приєднання РУ

3.2 Аналіз отриманих результатів

Статий режим розраховується з метою аналізу напруги у вузлах (табл. 3.2), струмів у гілках (табл. 3.1), та сумарних втрат потужності (табл. 3.3) й електроенергії.

Таблиця 3.1 – Розрахунок потоків потужностей та струмів

Расчет УР				Полный отчет по системе: Потстанции, Профили напряжения, Межсетевой обмен						
Расчет УР, кельнийский, симметричный, прямая посл.				Автоматическая адаптация модели сложности						
АВНТ МН				Да				Нет		
Учитывать пределы реакт. мощности				Нет				1,00 kVA		
								0,10 %		
				Уравнений модели						

Таблица 3.2 – Розрахунок напруги

Расчет УР		Полный отчет по системе: Подстанции, Профили напряжения, Межсетевой обмен							
Расчет УР, нелинейный, симметричный, прямая посл.	Да	Автоматическая адаптация модели складности		Нет					
АРНТ РПН	Нет	Макс. допустимая погрешность УР для		1,00 kVA					
Учитывать пределы реакт. мощности	Нет	Узлов		0,10 %					
		Уравнений модели							
	Ном. U [kV]	Bus - [p.u.]	Напр. [kV]	[deg]	-10	-5	Напр. 0	Отклонение [%]	+10
330кВ									
1СШ	330,00	1,054	347,84	-6,12				>>>>>>>>>>	
2СШ	330,00	1,045	346,32	-3,18				>>>>>>>>>>	
35кВ									
4СШ	35,00	1,050	36,76	28,83				>>>>>>>>>>	
35кВ									
1СШ	35,00	1,000	34,99	23,05					
35кВ									
3СШ	35,00	1,051	36,77	29,51				>>>>>>>>>>	
35кВ									
2СШ	35,00	1,017	35,59	23,49				>>>>	
500кВ									
1СШ	500,00	1,040	520,06	-5,38				>>>>>>>>>>	
2СШ	500,00	1,041	520,26	-4,76				>>>>>>>>>>	
750кВ									
1СШ	750,00	1,034	775,19	-2,76				>>>>>>>	
2СШ	750,00	1,044	783,10	-1,55				>>>>>>>>>>	
I СШ									
Запорізьська-750	750,00	1,050	787,50	0,00				>>>>>>>>>>	
I СШ									
Дніпропетровська-7	750,00	1,050	787,50	0,00				>>>>>>>>>>	

Таблица 3.3 – Розрахунок втрат потужності

Расчет УР		Полный отчет по системе: Подстанции, Профили напряжения, Межсетевой обмен								
Расчет УР, нелинейный, симметричный, прямая посл. АРНТ РПН Учитывать пределы реакт. мощности						Да Нет	Автоматическая адаптация модели складности Макс. допустимая погрешность УР для Узлов Уравнений модели			Нет 1,00 kVA 0,10 %
Уров. Напр.	Генерация [MW] / [Mvar]	Двиг. Нагр. [MW] / [Mvar]	Нагр. [MW] / [Mvar]	Комп- нсация [MW] / [Mvar]	Из внеш. сети [MW] / [Mvar]	Потокообмен с	Мощность Потокообмен [MW] / [Mvar]	Всего Потери [MW] / [Mvar]	Нагр. Потери [MW] / [Mvar]	Ненагр. Потери [MW] / [Mvar]
35,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00			0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00
						330,00 kV	-96,33 -35,59	0,63 8,90	0,39 7,54	0,24 1,26
						500,00 kV	-31,01 -9,45	0,02 1,00	-0,11 0,38	0,13 0,62
						750,00 kV	135,87 48,95	0,30 6,72	-0,07 4,84	0,37 1,89
330,00	0,00 0,00	0,00 0,00	318,00 112,00	0,00 0,00	0,00 0,00			0,30 0,30	0,00 0,00	0,00 0,00
						35,00 kV	95,70 26,79	0,63 8,90	0,39 7,54	0,24 1,26
						750,00 kV	-374,46 -124,58	0,69 20,66	0,45 19,40	0,24 1,26
500,00	0,00 0,00	0,00 0,00	356,00 132,00	0,00 0,00	0,00 0,00			0,30 0,30	0,00 0,00	0,00 0,00
						35,00 kV	31,03 10,46	0,02 1,00	-0,11 0,38	0,13 0,62
						750,00 kV	-398,90 -148,81	0,36 22,17	0,24 21,55	0,13 0,62
750,00	0,00 0,00	0,00 0,00	0,00 0,00	-0,00 0,00	677,76 54,42			2,42 -470,67	2,42 30,42	-0,00 -501,09
						35,00 kV	-135,76 -47,88	0,30 6,72	-0,07 4,84	0,37 1,89
						330,00 kV	375,15 145,25	0,69 20,66	0,45 19,40	0,24 1,26
						500,00 kV	399,26 170,98	0,36 22,17	0,24 21,55	0,13 0,62
Всего:	0,00 0,00	0,00 0,00	674,00 244,00	-0,00 0,00	677,76 54,42		0,00 0,00	3,76 -429,21	3,03 68,11	0,73 -497,32

Графічне представлення результатів розрахунку – це рис. 3.11.

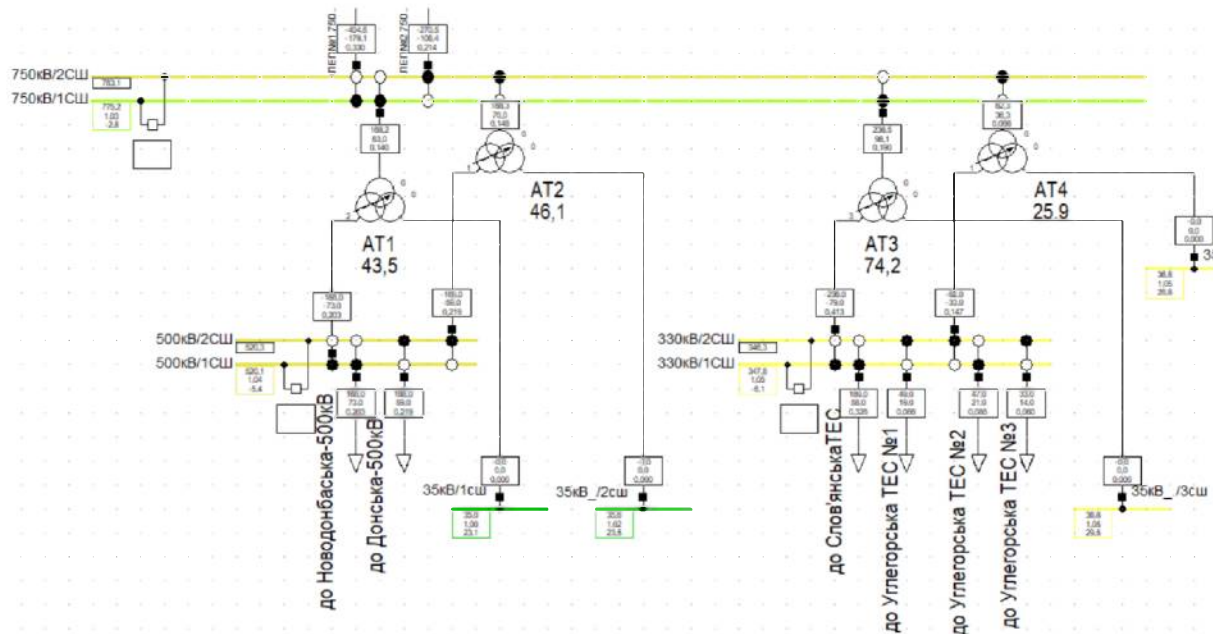


Рисунок 3.11 – Графічне представлення результатів

Для аварійних режимів визначаються струми в момент часу $t=0$ і $t=0,01$ сек. Для першого часу визначається періодична складова струму КЗ I_{n0} , а для останнього – ударний струм КЗ $i_{уд}$.

Розрахунок для симетричного КЗ – табл. 3.4 (рис. 3.12), для несиметричного КЗ (однофазного на землю) – табл. 3.5 (рис. 3.13).

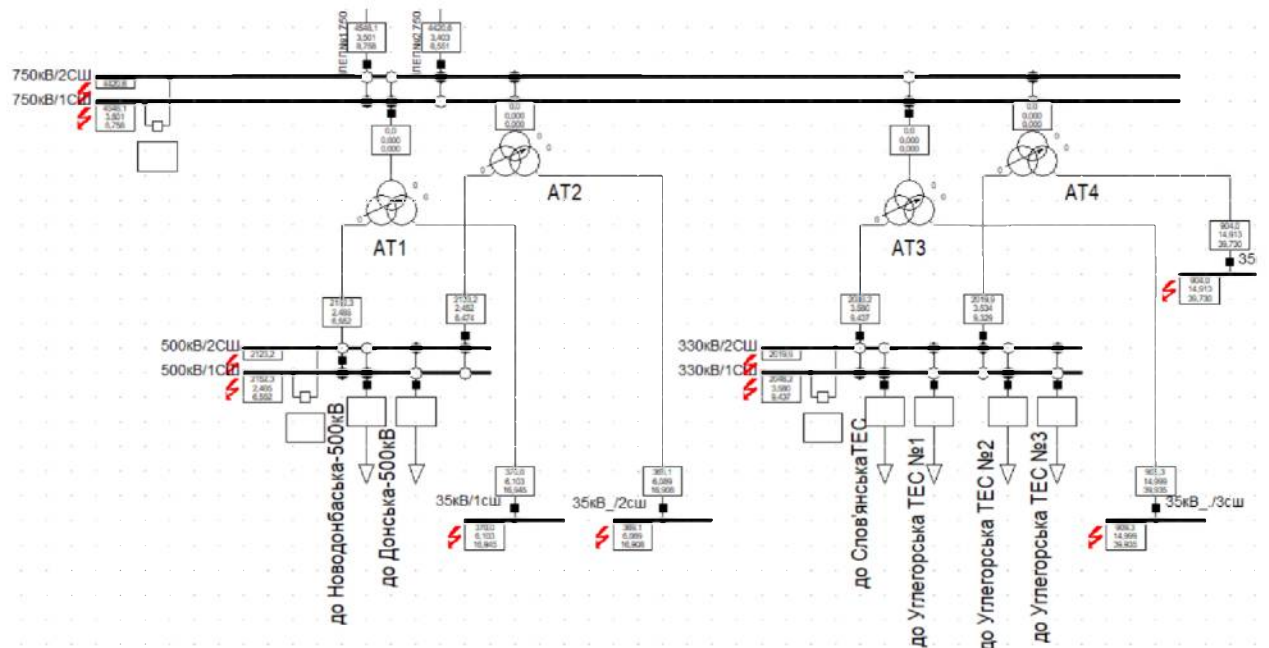


Рисунок 3.12 – Графічне представлення результатів

Таблиця 3.4 – Розрахунок струмів КЗ

Места повреждений с фидерами												
Расчет КЗ		/ Метод : VDE 0102		3-фазное КЗ				/ Макс. токи КЗ				
Асинхронные двигатели Всегда учитывать				Идентификация сети Автоматически				Длительность короткого замыкания Время откл. Время КЗ (Ith)				
Апериодическая составляющая (Idc) Используя метод В				Температура проводника Предопределена пользователем				Козф. напряжения с Предопределен пользователем Нет				
	Ном.О. [kV]	Напр. [kV]	[deg]	с- Козф.	Sk" [MVA/MBA]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
330кВ												
1СШ	330,00	0,00	0,00	1,10	2046,25 MVA	3,58 kA	-87,15	9,44 kA	3,58	2046,25	3,58	3,70
АТ3	750кВ	35кВ_			2046,25 MVA	3,58 kA	92,85	9,44 kA				
2СШ	330,00	0,00	0,00	1,10	2019,95 MVA	3,53 kA	-87,21	9,33 kA	3,53	2019,95	3,53	3,66
АТ4	750кВ	35кВ_			2019,95 MVA	3,53 kA	92,79	9,33 kA				
35кВ_												
4сш	35,00	0,00	0,00	1,10	904,02 MVA	14,91 kA	-87,59	39,73 kA	14,91	904,02	14,91	15,50
АТ4	750кВ	330кВ			904,02 MVA	14,91 kA	92,41	39,73 kA				
35кВ												
1сш	35,00	0,00	0,00	1,10	369,99 MVA	6,10 kA	-89,27	16,95 kA	6,10	369,99	6,10	6,87
АТ1	750кВ	500кВ			369,99 MVA	6,10 kA	90,73	16,95 kA				
35кВ_												
3сш	35,00	0,00	0,00	1,10	909,26 MVA	15,00 kA	-87,57	39,93 kA	15,00	909,26	15,00	15,59
АТ3	750кВ	330кВ			909,26 MVA	15,00 kA	92,43	39,93 kA				
35кВ_												
2сш	35,00	0,00	0,00	1,10	369,12 MVA	6,09 kA	-89,28	16,91 kA	6,09	369,12	6,09	6,86
АТ2	750кВ	500кВ			369,12 MVA	6,09 kA	90,72	16,91 kA				
500кВ												
1СШ	500,00	0,00	0,00	1,10	2152,27 MVA	2,49 kA	-87,15	6,55 kA	2,49	2152,27	2,49	2,57
АТ1	750кВ	35кВ			2152,27 MVA	2,49 kA	92,85	6,55 kA				
2СШ	500,00	0,00	0,00	1,10	2123,20 MVA	2,45 kA	-87,22	6,47 kA	2,45	2123,20	2,45	2,54
АТ2	750кВ	35кВ_			2123,20 MVA	2,45 kA	92,78	6,47 kA				
750кВ												
1СШ	750,00	0,00	0,00	1,10	4548,07 MVA	3,50 kA	-84,87	8,76 kA	3,50	4548,07	3,50	3,57
ЛЕПР1 750 кВ_a	Терминал				4548,07 MVA	3,50 kA	95,13	8,76 kA				
АТ1	500кВ	35кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
АТ3	330кВ	35кВ_			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
2СШ	750,00	0,00	0,00	1,10	4420,64 MVA	3,40 kA	-85,08	8,55 kA	3,40	4420,64	3,40	3,47
ЛЕПР2 750кВ_a	Терминал(1				4420,64 MVA	3,40 kA	94,92	8,55 kA				
АТ2	500кВ	35кВ_			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
АТ4	330кВ	35кВ_			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
I СШ.												
Запорізьська-750	750,00	0,00	0,00	1,10	10000,00 MVA	7,70 kA	-84,29	19,01 kA	7,70	10000,00	7,70	7,83
ЛЕПР2 750кВ	Терминал(1				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
Запорізьська-750					10000,00 MVA	7,70 kA	-84,29	19,01 kA				
I СШ												
Южнодонецька-7	750,00	0,00	0,00	1,10	10000,00 MVA	7,70 kA	-84,29	19,01 kA	7,70	10000,00	7,70	7,83
ЛЕПР1 750 кВ	Терминал				0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA				
Южнодонецька-7					10000,00 MVA	7,70 kA	-84,29	19,01 kA				

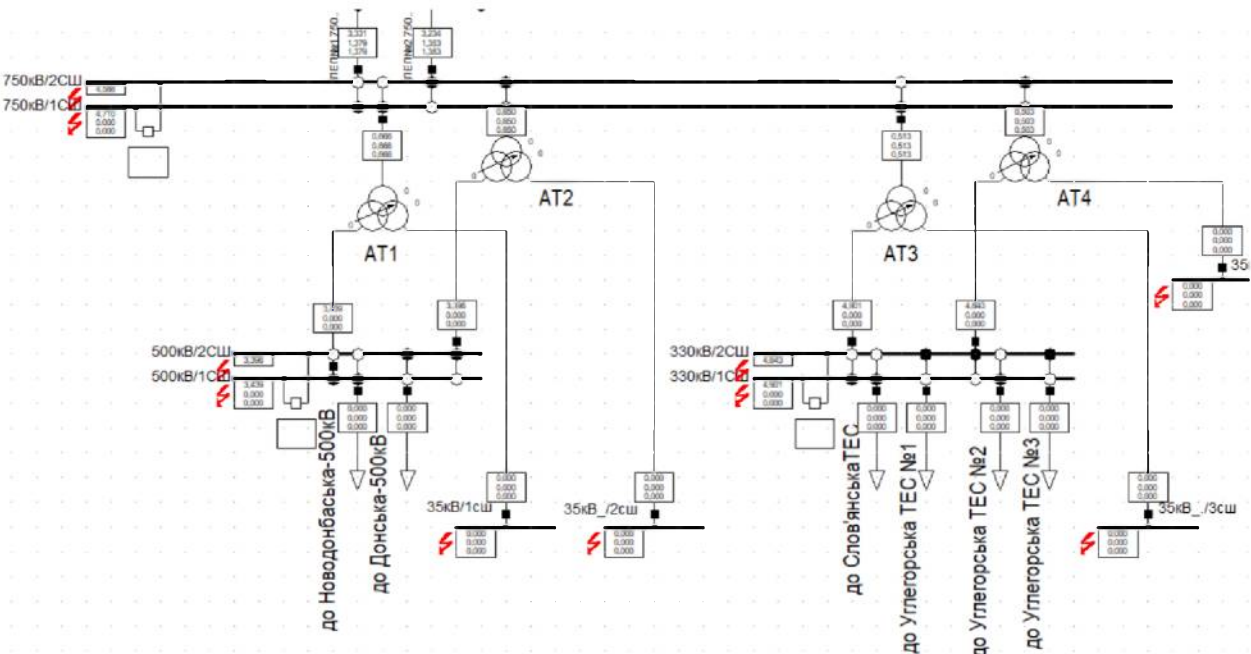


Рисунок 3.13 – Графічне представлення результатів

Таблица 3.5 – Розрахунок струмів однофазного КЗ

Места повреждения с фиксацией												
Расчет КЗ / Метод : VDE 0102						1-фазное КЗ на землю / Макс. ток КЗ						
Асинхронные двигатели				Идентификация сети			Длительность короткого замыкания					
Всегда учитывать				Автоматически			Время откл.					
							Время КЗ (Ith)					
				Температура проводника			Кэфф. напряжения с					
				Предопределена пользователем			Предопределен пользователем					
		Ном. U. [kV]	Напр. [kV]	α- [deg]	cos φ.	Sk" [MVA/МВА]	Ik" [kA/kA]	[deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
330кВ												
1СШ	A	220,00	0,00	0,00	1,10	923,83 MVA	4,90 kA	-27,39	12,92 kA	4,90	922,33	0,00
	B		184,75	-98,54		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	C		182,37	98,65		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
AT3		750кВ	35кВ			923,83 MVA	4,90 kA	92,61	12,92 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Сков'янскогоТ	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Углегорська	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
2СШ	A	220,00	0,00	0,00	1,10	922,70 MVA	4,84 kA	-27,44	12,72 kA	4,84	922,70	0,00
	B		184,63	-98,46		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	C		182,37	98,57		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
AT4		750кВ	35кВ			922,70 MVA	4,84 kA	92,56	12,72 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Углегорська	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Углегорська	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
35кВ												
4см	A	25,00	0,00	0,00	1,10	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		38,50	-150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		38,50	150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
AT4		750кВ	330кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
35кВ	A	25,00	0,00	0,00	1,10	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		38,50	-150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		38,50	150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
AT1		750кВ	500кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
35кВ	A	25,00	0,00	0,00	1,10	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		38,50	-150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		38,50	150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
AT3		750кВ	330кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
35кВ	A	25,00	0,00	0,00	1,10	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,00
	B		38,50	-150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
	C		38,50	150,00		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	1,73
AT2		750кВ	500кВ			0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
500кВ	A	500,00	0,00	0,00	1,10	992,88 MVA	2,44 kA	-27,37	9,07 kA	2,44	992,88	0,00
	B		279,07	-97,59		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	C		275,85	97,68		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
AT1		750кВ	35кВ			992,88 MVA	2,44 kA	92,63	9,07 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Новоднібаск	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
2СШ	A	500,00	0,00	0,00	1,10	980,22 MVA	2,40 kA	-27,43	8,97 kA	2,40	980,22	0,00
	B		279,97	-97,51		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,88
	C		275,85	97,60		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
AT2		750кВ	35кВ			980,22 MVA	2,40 kA	92,57	8,97 kA			
	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
до Дніська-500кВ	A					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	B					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
	C					0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA			
750кВ												
1СШ	A	750,00	0,00	0,00	1,10	2029,41 MVA	4,71 kA	-25,37	8,33 kA	4,71	2029,41	0,00
	B		424,44	-100,01		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,89
	C		412,64	100,27		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
ЛЕП#1 750 кВ_а		Термический				1442,29 MVA	2,32 kA	94,79	8,33 kA			
	A					597,13 MVA	1,35 kA	-25,74	2,45 kA			
	B					597,13 MVA	1,35 kA	-25,74	2,45 kA			
AT1		500кВ	35кВ			275,04 MVA	0,37 kA	94,26	0,00 kA			
	A					275,04 MVA	0,37 kA	94,26	0,00 kA			
	B					275,04 MVA	0,37 kA	94,26	0,00 kA			
AT3		230кВ	35кВ			222,09 MVA	0,51 kA	94,26	0,00 kA			
	A					222,09 MVA	0,51 kA	94,26	0,00 kA			
	B					222,09 MVA	0,51 kA	94,26	0,00 kA			

Продовження табл. 3.5 – Розрахунок струмів однофазного КЗ

2СШ	A	750,00	0,00	0,00	1,10	1986,48 MVA	4,59 kA	-25,54	8,13 kA	4,59	1986,48	0,00
	З		422,94	-99,22		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,89
	C		412,66	100,08		0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,87
ЛЕП2 750кВ_а	Терминал 1				A	1400,49 MVA	2,22 kA	94,60	8,13 kA			
					B	586,00 MVA	1,35 kA	-25,87	2,40 kA			
					C	586,00 MVA	1,35 kA	-25,87	2,40 kA			
AT2	500кВ	35кВ_			A	263,05 MVA	0,35 kA	94,13	0,00 kA			
					B	263,05 MVA	0,35 kA	94,13	0,00 kA			
					C	263,05 MVA	0,35 kA	94,13	0,00 kA			
AT4	230кВ	35кВ_			A	217,95 MVA	0,50 kA	94,13	0,00 kA			
					B	217,95 MVA	0,50 kA	94,13	0,00 kA			
					C	217,95 MVA	0,50 kA	94,13	0,00 kA			
1 СШ												
Запорізька-750А	750,00	0,00	0,00	1,10	3585,08 MVA	8,25 kA	-24,54	19,01 kA	8,28	2585,08	0,00	
	З		461,40	-115,99	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,97	
	C		457,33	116,24	0,00 MVA	0,00 kA	0,00	0,00 kA	0,00	0,00	0,96	
ЛЕП2 750кВ	Терминал 1				A	252,20 MVA	0,55 kA	92,15	0,00 kA			
					B	252,20 MVA	0,55 kA	92,15	0,00 kA			
					C	252,20 MVA	0,55 kA	92,15	0,00 kA			
Запорізька-750					A	2223,23 MVA	7,70 kA	-24,29	19,01 kA			
					B	252,20 MVA	0,55 kA	92,15	1,44 kA			
					C	252,20 MVA	0,55 kA	92,15	1,44 kA			
1 СШ												
Ожоденська-7А	750,00	0,00	0,00	1,10	3600,25 MVA	8,31 kA	-24,34	19,01 kA	8,31	2600,35	0,00	

В першому розділі своєї дипломної роботи мною розглядалися методи зниження крутизни і амплітуди падаючої хвилі.

В промисловості з цією метою використовуються керовані реактори, які зашунтують. Вони знижують комутаційні перенапруги, які можуть виникнути:

- по-перше, під час оперативних переключень (увімкнення або відключення ЛЕП);
- по-друге, під час дії релейного захисту, який фіксує перевищення напруги від номінальної $U_{ном}$ більше ніж на 10 %;
- звісно ж, під час роботи АПВ (однофазного чи трифазного).

Отже на рис. 3.14 наведений трисекційний керований реактор на вакуумних вимикачах. Принцип його роботи полягає у наступному:

1) спочатку повинна відбутися зміна напруги на шинах $U = var$ або потужності, що передається $P + jQ = var$. Зміни фіксуються трансформаторами струму TA і напруги TV .

2) отримані значення аналізує автоматичний регулятор (АР);

3) автоматичний регулятор керує розподільником сигналів керування (РСК), який в свою чергу керує кількістю реакторних секцій;

4) зміна кількості реакторних секцій змінює реактивну потужність споживання Q ;

5) реактивна потужність Q , звісно ж, впливає на напругу U згідно з балансом реактивної потужності.

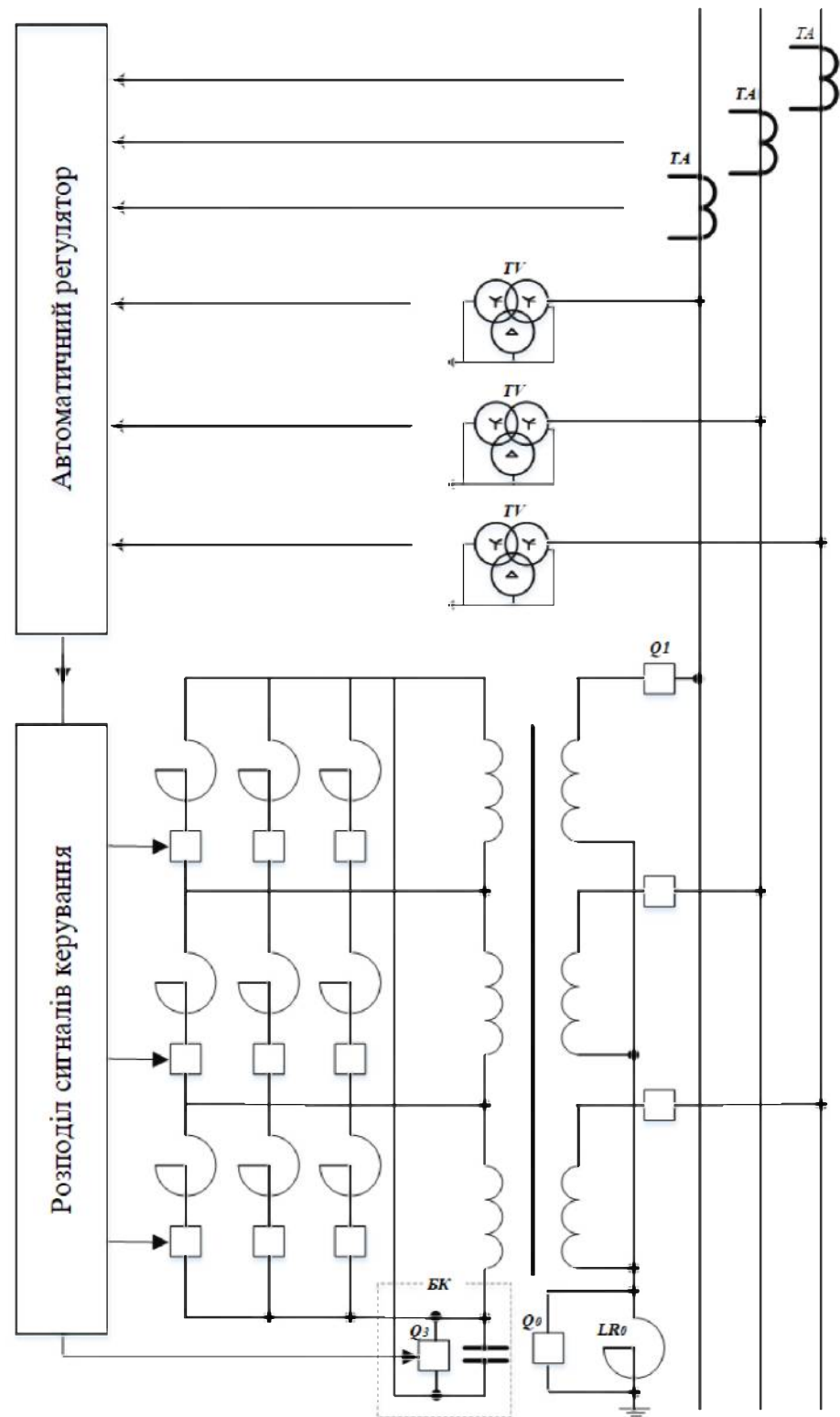


Рисунок 3.14 – Принципова схема

Оскільки зміна напруги може бути як з причини зміни навантаження, так і з причини аварійного короткого замикання, то в розподільнику сигналів керування є два канали.

Перший – повільнозмінний, який використовується при незначних змінах напруги. Враховуючи комутаційний ресурс вимикачів, цей канал налаштовується таким чином, щоб забезпечити регулювання напруги протягом доби і максимумів навантаження з мінімальною кількістю комутацій.

Другий – швидкозмінний, використовується при аварійних режимах і під час роботи АПВ.

Які складності виникають під час комутацій?

По-перше, аби виключити перехідні процеси, які виникають при неодночасному включенні реакторів, в розподільнику сигналів керування використовується пристрій синхронізації.

Крім того, при відключенні реакторів виникають перенапруги, обумовлені «зрізом струму» в індуктивності. Захист від перенапруги можна реалізувати або обмежувачами перенапруги (ОПН), або $L - C$ – ланцюгом.

В процесі повільного регулювання напруги вимикач Q_3 включений, батарея конденсаторів $БК$ закорочена і не використовується.

При швидкому регулюванні напруги, наприклад при однофазному автоматичному повторному включенні (ОАПВ), вимикачі Q_2 і Q_3 вимикаються. Це вводить в роботу конденсаторну батарею $БК$.

Або використовується інший спосіб гасіння дуги – включення в нейтраль трансформатора реактора LR_0 , коли вимикається вимикач Q_0 . В цей же час вводяться в роботу реактори LR , шляхом включення вимикачів Q_2 . Вимикач Q_3 включається і виводить з роботи батарею конденсаторів. А реактори компенсують ємність мережі і покращують умови гасіння дуги.

Таким чином можна зробити висновок щодо зниження комутаційних напруг шунтуючими реакторами:

- перед виконанням планового включення або відключення високовольтних ЛЕП до неї підключають реактор, що шунтує;
- при спрацьовуванні захисту ЛЕП від підвищення напруги, з уставкою $1,1U_{\phi}$, включаються всі реактори в місці спрацювання захисту, й якщо підвищення напруга не усунулося, ЛЕП відключається;
- при спрацьовуванні будь-якого захисту ЛЕП і подачі сигналу на відключення однієї або трьох фаз, в реакторах, що шунтують, одночасно включаються реактори всіх фаз, якщо вони у попередньому режимі були відключені.

3.3 Висновки за третім розділом

В даному розділі розглядалися перенапруги в автотрансформаторах підстанції 750 кВ і системні рішення щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги.

Це дозволяє отримати теоретичні знання і практичні навички захисту обладнання електричних мереж від перенапруги. В умовах нашої реальності, коли електричні мережі є зношеними, а ізоляція обладнання є старою і фізично не може витримати можливі перенапруги, це є актуальним.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Умови праці – сукупність усіх чинників, які необхідні для нормальної життєдіяльності працівників під час роботи. Вони характеризуються:

– загальними показниками: конструктивні особливості виробничого устаткування; особливості систем енергопостачання; зовнішні кліматичні умови та особливості розташування виробничого устаткування; наявність пристроїв для створення мікроклімату, освітлення, опалення тощо;

– локальними показниками: рівень статичних і динамічних навантажень працівників; рівень напруженості праці; кількісні показники небезпечних і (або) шкідливих виробничих чинників (НШВЧ); санітарно гігієнічні умовами у виробничих приміщеннях та на робочих місцях тощо.

За своїм походженням та природою дії НШВЧ поділяють на п'ять груп: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні та соціальні.

До фізичних НШВЧ відносяться машини та механізми або їх елементи, а також вироби, матеріали, заготовки тощо, які рухаються або обертаються; конструкції, які руйнуються; системи, устаткування або елементи обладнання, які знаходяться під підвищеним тиском; підвищена запиленість та загазованість повітря; підвищена або понижена температура повітря, поверхонь приміщення, обладнання, матеріалів; підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвуку, інфразвуку; підвищений або понижений барометричний тиск та його різкі коливання; підвищена та понижена вологість; підвищена швидкість руху та підвищена іонізація повітря; підвищений рівень іонізуючих випромінювань; підвищене значення напруги в електричній мережі; підвищені рівні статичної електрики, електромагнітних випромінювань; підвищена напруженість електричного, магнітного полів; відсутність або нестача світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; понижена контрастність; прямий та віддзеркалений блиск; підвищена пульсація світлового потоку; підвищені

рівні ультрафіолетової та інфрачервоної радіації; гострі кромки, задирки, шершавість на поверхні заготовок, інструментів та обладнання; розташування робочого місця на значній висоті відносно землі (підлоги); слизька підлога; невагомість.

До хімічних НШВЧ відносяться хімічні речовини, які по характеру дії на організм людини поділяються на токсичні, задушливі, наркотичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію. Основні способи потрапляння НШВЧ в організм – інгаляційний (органи дихання), пероральний (шлунково-кишковий тракт) і резорбційний (шкіряні покриви та слизисті оболонки).

До біологічних НШВЧ відносяться патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, рикетсії, спірохети, грибки, найпростіші) та продукти їхньої життєдіяльності, а також макроорганізми (тварини та рослини).

До психофізіологічних НШВЧ відносяться фізичні (статичні та динамічні) перевантаження і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Соціальні НШВЧ – це неякісна організація роботи, понаднормова робота, необхідність роботи в колективі з поганими відносинами між його членами, соціальна ізоляваність з відривом від сім'ї, зміна біоритмів, незадоволеність роботою, фізична та/або словесна образа та її ризик, насильство та його ризик.

На енергетичних об'єктах фіксують усі види НШВЧ.

Основними НШВЧ під час експлуатації електроустановок є електричний струм, напруга прямого і непрямого дотику, напруга кроку, електростатичні та електромагнітні поля промислової частоти, електрична дуга, яка утворюється під час комутації енергетичного устаткування.

Робота в умовах перевищення гігієнічних нормативів (3 та 4 клас умов праці) може бути дозволена тільки при застосуванні засобів колективного та індивідуального захисту і скороченні часу дії шкідливих виробничих

факторів (захист часом). Робота в небезпечних (екстремальних) умовах праці (4 клас) не дозволяється, за винятком ліквідації аварій, проведення екстрених робіт для попередження аварійних ситуацій. Ця робота повинна виконуватись у відповідних засобах індивідуального захисту та регламентованих режимах виконання робіт.

Особливості електротравматизму

Електротравматизм порівняно з травматизмом від інших небезпечних чинників притаманні такі особливості:

По-перше, несподіваність отримання електротравми – пов'язана з тим, що людина не має датчиків (рецепторів), за допомогою яких вона могла би дистанційно визначити наявність небезпеки (електричної напруги) на елементах обладнання (як, наприклад, інші небезпечні фактори – частини обладнання, що рухаються, нагріті деталі та інші). Не знаючи про небезпеку, людина сміливо доторкується до частини обладнання під напругою. Захисна реакція у цьому випадку виникає лише після включення людини під напругу, тобто після того, як через неї починає протікати електричний струм. Наслідки такого включення визначаються співвідношенням двох швидкостей: швидкості гальмівної дії електричного струму і швидкості захисної реакції організму. Якщо більше швидкість захисної реакції, людина самостійно відключається з ЕУ, а якщо більшою є швидкість гальмівної дії електричного струму, людина на певний час залишається включеною в електричне коло.

По-друге, можливість дистанційного отримання електротравм без безпосереднього контакту з установкою під напругою – це може бути ураження через електричну дугу, якщо людина наблизилася на критичну відстань до ЕУ напругою понад 1 кВ, або ураження напругою кроку, якщо людина знаходиться у зоні локальної землі у випадку замикання на землю в ЕУ.

Далі, можлива рефлекторність дії електричного струму – електричний струм, що протікає через тіло людини під час ураження, діє не тільки у

місцях контактів (точка входу і точка виходу), але ще спричиняє й рефлекторну дію, порушуючи роботу центрів, які координують роботу життєво важливих органів, найчастіше серцево-судинної системи та дихання.

Наступне, невідомість, прихованість більшості електротравм – розслідуванню, обліку та аналізу доступні лише електротравми з тяжкими та смертельними наслідками, а усі інші випадки включення людини в електричне коло залишаються невідомими, хоча причини цих електротравм, як правило, однакові; такий стан негативно впливає на профілактику електротравм.

Статистичні дані показують, що у загальному виробничому травматизмі електротравми становлять до 2% (в Україні до 3 %), тобто посідають останнє місце, а у травматизмі зі смертельним наслідком – висувуються на одне з перших місць, становлячи до 20 % (в Україні до 30 %). Особливо високий в Україні рівень побутового електротравматизму.

Чинники, які впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом: ь

1) протікання струму через тіло людини супроводжується термічним, електролітичним та біологічними ефектами.

2) термічна дія струму полягає у нагріванні тканин і випаровуванні вологи, що викликає опіки, обвуглення тканин та їх розриви парою.

3) електролітична дія струму проявляється у розкладі органічної речовини (її електролізі), у тому числі і крові, що зумовлює зміну її фізико-хімічних і біохімічних властивостей.

4) біологічна дія струму проявляється у порушенні біологічних процесів, що протікають в організмі, і супроводжується руйнуванням і збудженням тканин та скороченням м'язів.

Усі ці чинники умовно розділені на три групи:

- фактори електричного характеру,
- фактори неелектричного характеру
- фактори довкілля.

Фактори електричного характеру. Головним небезпечним фактором у випадку електротравм вважається електричний струм, що протікає через людину. Від величини (сили) цього струму залежать наслідки ураження.

Виділяють такі порогові значення струму, тобто ті мінімальні значення, які викликають певні дії:

– пороговий відчутний струм – це мінімальне значення струму, який людина сприймає у вигляді ледь відчутних подразнень; її значення для змінного струму дорівнює 0,7... 1,5 мА, для постійного – 5... 7 мА;

– пороговий невідпускаючий струм – це мінімальна величина струму, яка викликає судомне скорочення м'язів, і людина не може самостійно звільнитися від струмовідних частин; її значення для змінного струму дорівнює 10... 15 мА, для постійного – 50... 80 мА;

– пороговий фібриляційний струм – це мінімальна величина струму, що викликає фібриляцію серця; її значення для змінного струму дорівнює 100 мА, для постійного – 300 мА.

Залежність допустимих струмів, які можуть протікають через людину, і напруг дотику від тривалості дії наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Граничні значення струмів і напруг дотику від тривалості дії

Вид струму	Нормована величина	Гранично допустимі струми (мА), і напруги, В, у випадку включення в електричне коло, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	Понад 1
Змінний струм 50 Гц	I_{∂}	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6
	U_{∂}	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36
Постійний	I_{∂}	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15
	U_{∂}	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40

Допустимі значення струму у випадку тривалої дії: для змінного струму промислової частоти – 0,6 мА, для постійного – 1 мА.

Напруга на тілі людини впливає на тяжкість ураження. Допустима напруга на тілі людини у випадку тривалої дії складає для змінного струму 2 В, для постійного – 8 В.

ВИСНОВКИ

Процеси, які протікають в електричних мережах, характеризуються значною швидкістю протікання процесів, та значною величиною струмів та напруг при аварійних процесах. В даній роботі розглянуті процеси, які виникають в лініях електропередачі і силових трансформаторах при атмосферних і комутаційних перенапругах.

В роботі розглядалися задачі дослідження перенапруги в електричних мережах. Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі досліджувалися хвильові процеси в лініях електропередачі, що виникають при комутаціях будь-якого типу: включення на напругу джерела живлення, відключення від джерела живлення, виникнення коротких замикань, ураження ліній електропередачі блискавкою. У другому розділі досліджувалися хвильові процеси в силових трансформаторах. Розглянутий вплив імпульсної корони, вплив перенапруги на обмотки трансформатора. У третьому розділі досліджувалися перенапруги в автотрансформаторах підстанції 750 кВ, виконаний розрахунок коротких замикань. Розглянуті системні рішення щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги. У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

В даній роботі є розгляд перенапруги в автотрансформаторах підстанції 750 кВ, розгляд системних рішень щодо захисту трансформаторів підстанції від перенапруги.

Це дозволяє отримати теоретичні знання і практичні навички захисту обладнання електричних мереж від перенапруги. В умовах нашої реальності, коли електричні мережі є зношеними, а ізоляція обладнання є старою і фізично не може витримати можливі перенапруги, тема роботи є актуальною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. 2017. 617 с. <https://art-energetyka.com.ua/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0-%D1%83%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BA.pdf>
2. C. W. T. McLyman. Transformer and Inductor Design Handbook, 2004. - <https://doi.org/10.1201/9780203913598>.
3. High-Voltage Resonant Converter with Extreme Load Variation: Design, Criteria and Applications / J. A. Pomilio, O. Bet, M. P. Vieira. / International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering. – Volume 8, № 12, 2014, pp. 1764-1769. - <https://doi.org/10.5281/zenodo.1097387>
4. Temporary overvoltage suppression in half-wavelength transmission lines during asymmetric faults / F. P. Albuquerque, R. F. Pereira, E. C. Costaa, L. H. Libonib. // Electric Power Systems Research. – Volume 178, 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106028>.
5. Overvoltage protection for high voltage power transformers. / D. T. Mendes de Souza¹, Br. Valverde, J. A. Pomilio // Eletrôn. Potên., Fortaleza. – Volume 25, №. 1, pp. 125-134, 2020. - <https://doi.org/10.18618/rep.2020.1.0045>
6. Recognition Algorithm of Transient Overvoltage Characteristic Based on Symmetrical Components Estimation / Y. Han, J. Zhang // Mathematical Modeling and Computational Methods in Science and Engineering – № 12(1), 2020. – <https://doi.org/10.3390/sym12010114>
7. Overvoltage transient protection network design / S. Karunakaran, A.P. Sajeev // Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility – 8-9 Dec. 1999 – <https://doi.org/10.1109/icemic.1999.871678>
8. Method for Suppressing Neutral Point Displacement Overvoltage and Suppression Circuit in Distribution Network / L. Kai; X. Guojie; G. Xiaojing; Y. Kun; Ch. Duohong; L. Ran; Ch. Fan; Z. Xiangjun // 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED) - 17-19 Sept. 2018 - <https://doi.org/10.1109/CICED.2018.8592153>

9. Internal Overvoltage Identification of Distribution Network via Time-Frequency Atomic Decomposition / W. Gao; R.-J. Wai; Y.-F. Liao; M.-F. Guo; Y. Yang // IEEE Access - Volume: 25, pp. 85110–85122, 2019. - <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925108>

10. Distribution Network Protection Using Smart Dual Functional Series Resonance-Based Fault Current and Ferroresonance Overvoltage Limiter / H. Radmanesh // IEEE Transactions on Smart Grid - Volume: 9, Issue: 4, pp. 3070-3078, 2018. - <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2626152>