

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

**До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри  
енергетики та  
електротехнічних систем**

---

**доцент Чепіжний А.В.**

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження параметрів районної  
електричної мережі 110 Кв з розробкою заходів  
запобігання перенапруг в магістральних лініях»

Виконав

\_\_\_\_\_ (підпис)

Коваленко К.М.  
(прізвище, ініціали)

Група

ЕТЕС 2301-2м

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сіренко Ю.В.  
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

доцент \_\_\_\_\_ Чепіжний А.В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Коваленка Костянтина Миколайовича*

(прізвище, ім'я та по батькові)

**1. Тема роботи:** *Дослідження параметрів районної електричної мережі 110 Кв з розробкою заходів запобігання перенапруг в магістральних лініях*

керівник роботи: *Сіренко Юлія Володимирівна, PhD, доцент*

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

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «26» 02 2024 р. № 572/ос

**2. Термін подання здобувачем закінченої роботи** «18» 03 2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи** *технічні характеристики системи електропостачання районної електричної мережі 110 кВ, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.*

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, що підлягають розробці):

1. Стан питання та постановка задач досліджень.

2. Обґрунтування та вибір технічних засобів для запобігання комутаційним перенапругам.

3. Дослідження параметрів роботи районної електричної мережі 110 кВ при виникненні комутаційних перенапруг.

4. Охорона праці.

5. Економічне обґрунтування.

Висновки та пропозиції.

Список використаної літератури

Додатки.

**5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

**6. Консультанти розділів роботи:**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

**КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК**

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Збір інформації про діяльність в господарстві	до 13.09.2024 р.	
2	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 04.10.2024 р.	
3	Складання плану роботи	до 11.10.2024 р.	
4	Написання вступу	до 18.10.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 01.11.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 29.11.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 10.01.2025 р.	
8	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 28.02.2025 р.	
9	Написання висновків та пропозицій	до 07.03.2025 р.	
10	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 10.03.2025 р.	
11	Подання роботи на рецензування	до 14.03.2025 р.	
12	Подання до попереднього захисту	до 19.03.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

(Коваленко К.М.)

(прізвище, ініціали)

(Науковий) керівник  
дипломної роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

(Сіренко Ю.В.)

(прізвище, ініціали)

## АНОТАЦІЯ

*Коваленко К.М. Дослідження параметрів районної електричної мережі 110 кВ з розробкою заходів запобігання перенапруг в магістральних лініях. ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Сумський національний аграрний університет. Суми. 2025.*

Дипломна робота присвячена вивченню комутаційних перенапруг у районній електричній мережі напругою 110 кВ та розробці ефективних заходів для їх запобігання.

У першому розділі роботи розглядається поняття перенапруг в електричній мережі, зокрема комутаційних перенапруг. Визначаються їх типи, причини виникнення та негативний вплив на мережу. Перенапруги характеризуються ненормальним функціонуванням електричних мереж, при якому напруга підвищується вище допустимих значень на окремих ділянках мережі, що може бути небезпечним для апаратури. Встановлено, що причинами їх виникнення можуть бути різкі зміни навантаження на лінії електропередач, явища ферорезонансу та експлуатація мереж в аварійних умовах. Складено класифікацію комутаційних перенапруг.

Другий розділ присвячений аналізу способів та методів запобігання комутаційним перенапругам. Оцінюються існуючі засоби захисту, їх ефективність, а також обґрунтовується вибір оптимальних технічних рішень для досліджуваної мережі.

Третій розділ містить дослідження впливу різних факторів на величину комутаційних перенапруг. Аналізується вплив довжини лінії, активного та реактивного навантаження на величину перенапруг. Проведено імітаційне моделювання роботи лінії електропередачі напругою 110 кВ при виникненні комутаційних перенапруг при різних режимах роботи: на холостому ході, з активним та реактивним навантаженням. Встановлено, що зі збільшенням довжини лінії електропередачі величина комутаційних перенапруг

збільшується. Зі збільшенням довжини лінії електропередачі зростають індуктивний опір та хвильові процеси, що призводить до більш високих комутаційних перенапруг.

У четвертому розділі висвітлюються питання охорони праці під час експлуатації електричних мереж, а також заходи, що забезпечують безпеку працівників.

У п'ятому розділі розглядаються економічні аспекти реалізації запропонованих заходів щодо запобігання комутаційним перенапругам. Виявлено, що використання обмежувачів перенапруг типу ОПН у розподільчих електричних мережах є економічно доцільним і стратегічно важливим рішенням, яке дозволяє значно підвищити надійність та безпеку системи. ОПН ефективно знижують рівень перенапруг на 30–50%, що зменшує частоту пошкоджень обладнання на 40–60% і відповідно скорочує витрати на його ремонт і заміну.

**Ключові слова:** комутаційні перенапруги, електрична мережа, запобігання перенапругам, технічні засоби, вплив довжини лінії, активне навантаження, реактивне навантаження.

## ABSTRACT

Kovalenko K.M. Research of parameters of the district electric network of 110 kV with development of measures for prevention of overvoltages in main lines. OPP "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", specialty 141 "Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics", Sumy National Agrarian University. Sumy. 2025.

The thesis is devoted to the study of switching overvoltages in the 110 kV district electrical network and the development of effective measures to prevent them.

The first section of the work considers the concept of overvoltages in the electrical network, in particular switching overvoltages. Their types, causes of occurrence and negative impact on the network are determined. Overvoltages are characterized by abnormal functioning of electrical networks, in which the voltage rises above permissible values in individual sections of the network, which can be dangerous for equipment. It has been established that the causes of their occurrence may be sudden changes in the load on power transmission lines, ferroresonance phenomena, and operation of networks in emergency conditions. A classification of switching overvoltages has been developed.

The second section is devoted to the analysis of methods and techniques for preventing switching surges. Existing protection measures, their effectiveness are assessed, and the choice of optimal technical solutions for the network under study is justified.

The third section contains a study of the influence of various factors on the magnitude of switching overvoltages. The influence of the length of the line, active and reactive load on the magnitude of the overvoltages is analyzed. A simulation of the operation of a 110 kV power transmission line when switching overvoltages occur in different operating modes: idling, with active and reactive load. It has been established that with increasing length of the power transmission line, the magnitude of switching overvoltages increases. With increasing length of the power

transmission line, inductive reactance and wave processes increase, which leads to higher switching overvoltages.

The fourth section covers occupational safety issues during the operation of electrical networks, as well as measures to ensure the safety of workers.

The fifth section examines the economic aspects of implementing the proposed measures to prevent switching overvoltages. It is found that the use of surge arresters of the APR type in distribution electrical networks is an economically feasible and strategically important solution that allows significantly increasing the reliability and safety of the system. Surge arresters effectively reduce the level of overvoltages by 30–50%, which reduces the frequency of equipment damage by 40–60% and, accordingly, reduces the costs of its repair and replacement.

**Keywords:** switching overvoltages, electrical network, overvoltage prevention, technical means, influence of line length, active load, reactive load.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Поняття перенапруг в електричній мережі та їх визначення .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Комутаційні перенапруги та їх класифікація .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3. Причини виникнення комутаційних перенапруг та їх негативний вплив на електричну мережу.....</b>	<b>14</b>
<b>1.4. Висновки до розділу.....</b>	<b>16</b>
<b>2. ОБГРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КОМУТАЦІЙНИМ ПЕРЕНАПРУГАМ.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Способи та методи запобігання комутаційним перенапругам .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Засоби запобігання комутаційним перенапругам .....</b>	<b>19</b>
<b>2.3. Оцінка ефективності існуючих способів та засобів обмеження комутаційних перенапруг.....</b>	<b>22</b>
<b>2.4. Висновки до розділу.....</b>	<b>23</b>
<b>3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ РАЙОННОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ ПРИ ВИНИКНЕННІ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Аналіз впливу довжини лінії на величину перенапруг.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2. Аналіз впливу активного навантаження на величину комутаційних перенапруг .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3. Аналіз впливу реактивного навантаження на величину комутаційних перенапруг.....</b>	<b>28</b>
<b>3.4. Висновки до розділу.....</b>	<b>30</b>
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>31</b>
<b>5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....</b>	<b>35</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>37</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>39</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Актуальність теми пов'язана з тим, що перенапруги в електричній мережі є серйозною загрозою для всіх видів електрообладнання. Проблема полягає в тому, що через природу цього явища повністю виключити його виникнення неможливо. У зв'язку з цим необхідно вивчати рішення для захисту електрообладнання, щоб мінімізувати негативні наслідки підвищення напруги.

Перенапруги небезпечні, оскільки можуть завдати шкоди обладнанню, підключеному до мережі, а також зруйнувати ізоляцію електричного обладнання. У такому випадку виникає загроза життю людини і підвищується ризик виникнення аварійних ситуацій.

Комутаційні перенапруги виникають через різкі зміни режиму роботи електричної мережі, пов'язані з увімкненням або вимкненням потужних споживачів, ємнісного або індуктивного характеру навантаження. Ці явища називаються перехідними процесами. У такому випадку величина імпульсів і хвиль досягає десятків і сотень вольт і визначається характеристиками електричної мережі.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження причин виникнення комутаційних перенапруг та способів їх зменшення в електричних мережах.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

- визначити суть перенапружень в електричних мережах;
- виявити причини виникнення комутаційних перенапруг в електричних мережах;
- визначити негативний вплив комутаційних перенапруг на роботу електроустановок;
- запропонувати способи зменшення комутаційних перенапруг в електричних мережах.

– виконати імітаційне моделювання роботи лінії при виникненні комутаційних перенапруг у різних режимах роботи.

**Об’єктом дослідження** є магістральні лінії передачі електричної енергії напругою 110 кВ.

**Предметом дослідження** є параметри магістральні лінії передачі електричної енергії напругою 110 кВ та аналіз впливу параметрів ліній на характеристики перенапруг.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що отримані в ході виконання випускної кваліфікаційної роботи результати можуть бути використані на практиці в проектних та експлуатаційних організаціях.

## 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1. Поняття перенапруг в електричній мережі та їх визначення

Перенапряга в електричній мережі – це раптове та короткочасне підвищення напруги в електричній системі, яке перевищує нормальні робочі значення. Перенапруги за місцем виникнення можуть бути [1-5]:

- внутрішні, які виникають внаслідок аварій, комутацій і різних резонансних явищ;
- зовнішні, джерелом яких є розряд блискавки або будь-яке інше зовнішнє джерело.

Крім того, внутрішні перенапруги можна класифікувати на такі складові (рис. 1.1) [6]:

- атмосферні, які формуються в результаті грозових розрядів;
- комутаційні, які виникають внаслідок переключень;
- перехідні, викликані струмами промислової частоти;
- електростатичні, які виникають внаслідок електростатичних впливів.



Рис. 1.1. Класифікація перенапруг в електричних мережах

Перенапруга означає підвищення напруги в електричних мережах або лініях електропередачі, що перевищує задану норму.

У нормативних документах описані два варіанти прояву високої напруги:

1. Імпульсна перенапруга – проявляється як різке збільшення амплітуди напруги з подальшим зменшенням або поверненням до початкового значення (рис. 1.2). Тривалість імпульсу становить менше 10,0 мілісекунд [7, 8].

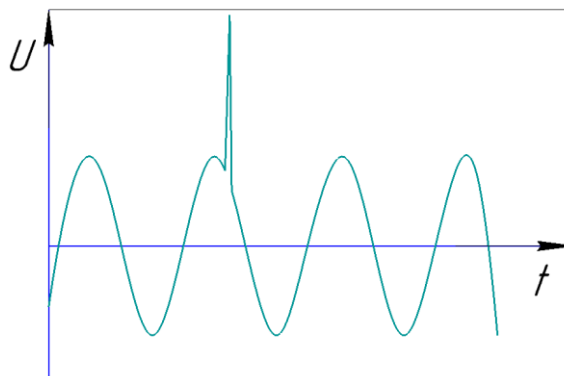


Рис. 1.2. Приклад імпульсної перенапруги в мережі

2. Ефект тимчасової перенапруги – у цьому випадку понад 10,0% від номінального значення спостерігається протягом більш ніж 10,0 мс, як показано на рис. 1.3 [9, 10].

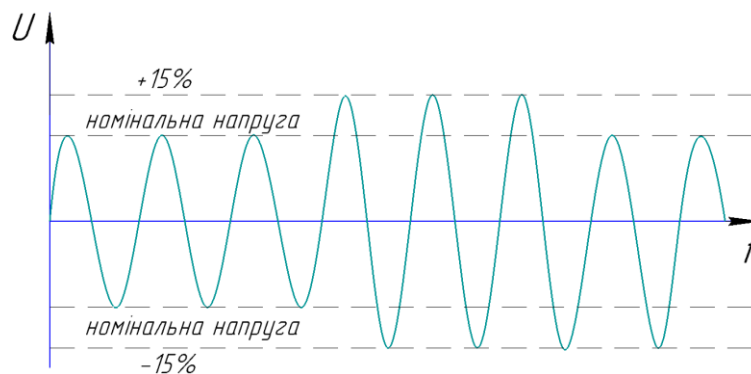


Рис. 1.3. Приклад тимчасової перенапруги в мережі

Отже, перенапруги, що виникають в електроустановках, поділяються на дві основні категорії.

Перша – це зовнішні або атмосферні перенапруги, які пов'язані з впливом блискавки або перенапругами, що виникають через неї, на електричну установку. Друга категорія – внутрішні або комутаційні перенапруги, які з'являються під час звичайної експлуатації електроустановки. Приклад стандартної комутаційної перенапруги представлений на рисунку 1.4.

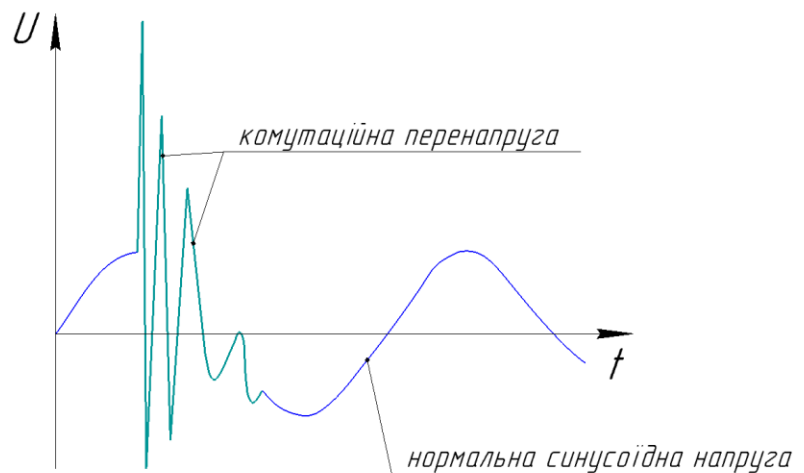


Рис. 1.4. Характер комутаційної перенапруга в електричній мережі

Комутаційні перенапруги можуть виникати як під час нормальної комутації ланцюгів, так і в умовах аварійних ситуацій або під час ремонту електричної системи.

## 1.2. Комутаційні перенапруги та їх класифікація

Комутаційні перенапруги виникають внаслідок різких змін у режимах роботи електричної мережі. Вони можуть з'являтися при активації або деактивації комутаційних пристроїв (включення та виключення елементів мережі), при пошкодженні ізоляції (включаючи повторне виникнення дуги) та під час різких змін параметрів у нелінійних елементах [1, 2].

Класифікацію комутаційних перенапруг представлено на рисунку 1.5 [1]. Комутаційні перенапруги поділяються на кілька видів, кожен з яких

виникає в певних ситуаціях. Перенапруги при включенні лінії виникають, коли лінія підключається до електричної мережі. У цьому випадку раптове підключення може викликати значне збільшення напруги, оскільки струм починає протікати через новоз'єднані елементи, що створює імпульсні перенапруги.

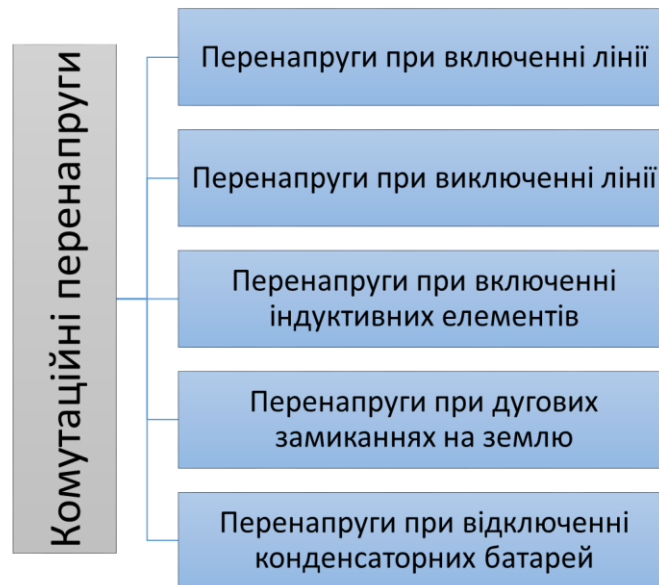


Рис. 1.5. Класифікація комутаційних перенапруг

Перенапруги при виключенні лінії виникають під час відключення лінії з електричної мережі. У момент відключення енергія, накопичена в індуктивних елементах, може призвести до стрибка напруги, що створює ризик пошкодження обладнання.

Перенапруги при відключенні конденсаторних батарей виникають, коли ці батареї відключаються від мережі. Конденсатори, накопичуючи електричний заряд, при відключенні можуть створити різкий стрибок напруги, що становить загрозу для стабільності роботи електричної системи.

Кожен з цих видів комутаційних перенапруг має свої специфічні причини та наслідки, і їх важливо враховувати при проектуванні та експлуатації електричних мереж для забезпечення надійності та безпеки.

### **1.3. Причини виникнення комутаційних перенапруг та їх негативний вплив на електричну мережу**

Причинами виникнення комутаційних перенапруг можуть бути такі фактори [1, 2]:

- різке вимкнення навантаження внаслідок спрацювання захисних пристроїв, наприклад, повітряні вимикачі можуть створювати сильні перешкоди, особливо при аварійному відключенні ліній електропередач;
- комутація конденсаторних установок;
- вимкнення потужних електричних машин і силових трансформаторів, що викликає вплив індуктивних струмів на лінію;
- перекомутація ліній.

Відключення ємнісних струмів в електричних колах може призводити до багаторазового виникнення дуги у вимикачі, що супроводжується повторюваними перехідними процесами і перенапругами. Також це стосується відключення малих індуктивних струмів без навантаження, яке може викликати примусове повторне ввімкнення вимикача та вібраційні коливання. При замиканнях на землю в мережах з ізольованою нейтраллю часто спостерігається багаторазове запалювання дуги, що спричиняє перенапруги.

Основною причиною виникнення квазістаціонарних перенапруг є ємнісний ефект, який може бути викликаний, наприклад, живленням односторонньої лінії від генераторів.

Додатковими причинами виникнення комутаційних перенапруг можуть бути:

- ввімкнення або вимкнення пристроїв релейного захисту (автоматичних вимикачів, плавких запобіжників, реле, контакторів);
- зупинка чи запуск потужних синхронних або асинхронних двигунів, а також трансформаторів;
- комутація батарей статичних конденсаторів.

Ризик розриву ненавантаженої лінії з використанням масляного вимикача невеликого об'єму посилюється тим, що перекриття ізоляції,

викликане перенапругою, може призвести до пошкодження автоматичного вимикача. Якщо при розриві лінії відбувається коротке замикання, струм різко зростає, і вимикач може не зуміти загасити дугу.

Для обмеження перенапруг під час вимкнення ліній використовуються обмежувачі перенапруг або нелінійні пристрої захисту [11-16]. Однак часті спалахи дуги під час кожної комутації збільшують навантаження на резистори цих пристроїв. Таким чином, перенапруги при комутації ненавантажених ліній електропередачі пов'язані з включенням або відключенням ємнісних струмових вимикачів.

Крім того, перенапруги можуть спричинити передчасне старіння та деградацію елементів електроустановок, таких як трансформатори, конденсатори й електродвигуни. Це знижує їхню ефективність і надійність, а також вимагає частіших технічних обслуговувань або заміни, що підвищує витрати. Також можливе виникнення сильних електричних дуг, які не тільки пошкоджують електрообладнання, але й становлять небезпеку для персоналу, що обслуговує мережу. У деяких випадках перенапруги можуть призвести до виникнення пожеж через перегрівання електричних компонентів або загоряння ізоляційних матеріалів.

Нестабільність у мережі, викликана перенапругами, здатна призвести до відключень електроенергії або перебоїв у роботі чутливих до стрибків напруги приладів, таких як комп'ютери та інша електроніка. Це може вплинути на роботу підприємств і знизити продуктивність у різних секторах економіки [17-19].

Таким чином, перенапруги є небажаним явищем, яке може завдати значної шкоди обладнанню, створювати ризики для безпеки та впливати на надійність електропостачання.

#### **1.4. Висновки до розділу**

Проаналізовано поняття перенапруг. Перенапруги характеризуються ненормальним функціонуванням електричних мереж, при якому напруга підвищується вище допустимих значень на окремих ділянках мережі, що може бути небезпечним для апаратури. Встановлено, що причинами їх виникнення можуть бути різкі зміни навантаження на лінії електропередач, явища ферорезонансу та експлуатація мереж в аварійних умовах.

## **2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ КОМУТАЦІЙНИМ ПЕРЕНАПРУГАМ**

### **2.1. Способи та методи запобігання комутаційним перенапругам**

Надійне функціонування електроустановок забезпечується лише тоді, коли ізоляція витримує максимальні напруги, що можуть виникати під час довготривалої роботи та перенапруг.

Перенапруги під час комутації лінії можна знизити за допомогою низки заходів [20-24].

1. Заходи для обмеження вимушеної складової комутаційних перенапруг. Вони включають поділ віддалених ліній електропередач на секції, довжина яких не перевищує 250–300 км, з підключенням пристроїв підтримання нормального рівня напруги в проміжних точках. Також слід вибрати таку послідовність підключення лінії, при якій спочатку здійснюється підключення до шин потужнішої підстанції, а потім – до менш потужної.

2. Заходи для зменшення перехідної складової комутаційного процесу при включенні ліній. Сюди відносяться встановлення шунтувальних опорів у вимикачах та "синхронне включення" вимикачів. Також можна знизити інтенсивність перехідного процесу шляхом тимчасового введення активних опорів у ланцюг струму, який протікає через шунтувальні реактори. Це, наприклад, можна реалізувати шляхом включення резистора в нейтраль обмоток групи трифазних реакторів під час комутації.

Ризик розриву ненавантаженої лінії з малим масляним вимикачем посилюється через те, що перенапруги можуть призвести до пробію ізоляції, що в свою чергу здатне зруйнувати автоматичний вимикач. Якщо при цьому виникне коротке замикання і струм різко збільшиться, вимикач може не впоратися з гасінням дуги. Один із кардинальних способів боротьби з

подібною перенапругою – використання вимикачів, здатних уникати небезпечного повторного займання дуги при відключенні лінії.

Іншим методом є оснащення лінії пристроями для зняття залишкового заряду, зокрема встановленням вимірювального пристрою на лінію із трансформатором електромагнітної напруги або іншими способами для усунення залишкового заряду. Підключення до лінії змішувального реактора також показало свою ефективність: за рахунок наближення кривої напруги на лінії до ЕРС напруга між контактами перемикача зростає повільніше, що знижує вірогідність повторного займання дуги.

Для зменшення коефіцієнта перенапруги при автоматичному повторному включенні лінії до запланованих параметрів можна зняти залишковий заряд у момент збою живлення. Це можливо через підключення до лінії трансформатора напруги електромагнітного типу або спеціального реактора з високим активним опором у обмотках.

У мережах 500 кВ виключення трансформатора напруги (ТН) з лінії дозволило усунути перенапругу при автоматичному замиканні, наближаючи розподільні характеристики під час комутацій до зсунутої у часі комутації ліній. У деяких випадках перехід з трифазного підключення на автоматичне повторне підключення (ОАПВ) також сприяє зниженню перенапруг під час ліквідації аварійних ситуацій на лінії.

## **2.2. Засоби запобігання комутаційним перенапругам**

В електричних установках для захисту обладнання від можливих перенапруг використовуються захисні пристрої, такі як обмежувачі і пристрої захисту від нелінійних перенапруг (ОПН) [23]. Основна конструктивна частина цього захисного пристрою – елемент з нелінійними властивостями – варистори (рис. 2.1). Ці елементи відрізняються тим, що змінюють свій опір залежно від значення напруги, прикладеної до них.

Розглянемо принцип роботи цих захисних елементів. Мережевий фільтр підключається до шини живлення та до заземлювального контуру електроустановки. При нормальній роботі, тобто коли напруга в мережі перебуває в межах допустимих значень, стопор (стопорний пристрій) має дуже високий опір і не проводить напругу. При виникненні перенапруги в частині електричної мережі опір стопора різко знижується, і цей захисний елемент проводить напругу, що сприяє утечці згенерованого підйому напруги в заземлювальний контур. Тобто в момент перенапруги стопор (ОПН) виконує електричне з'єднання проводу з масою.



Рис.2.1. Будова нелінійного обмежувача перенапруг (ОПН)

Обмеження перенапруг при вимкненні ліній може виконуватися за допомогою вентилярних розрядників (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Вентильний розрядник:

Однак при цьому, через багаторазові спалахи дуги під час кожної комутації, відбувається прискорене витрачання ресурсу пропускної здатності резисторів цих апаратів. Особливо не вигідним є автоматичне закриття лінії при тривалому короткому замиканні, яке не було усунуто операцією автоматичного замикання. При такій комутації кількість перенапруг у справних фазах зростає через збільшення складової напруги в усталеному режимі, викликаній несиметричним струмом короткого замикання, що протікає в мережу.

Такі невдалі автоматичні вимкнення становлять лише близько 20% від загальної кількості автоматичних перемикачів ліній у мережах 110–500 кВ. Тому, незважаючи на збільшення значень перенапруги, ці перемикачі мало впливають на статистичні властивості загального струму перенапруги, що впливає на ізоляцію ліній передачі високої напруги. Всі засоби, перераховані вище, мають використовуватися для захисту від перенапруги через автоматичне замикання лінії: заходи з обмеження примусової складової, шунтуючі резистори в автоматичних вимикачах, синхронне підключення лінії, а також пристрої зупинки та пристрої захисту від перенапруги.

### **2.3. Оцінка ефективності існуючих способів та засобів обмеження комутаційних перенапруг**

Найкраще завдання обмеження перенапруг при включенні ліній вирішується шляхом комплексного використання перерахованих заходів. В енергосистемах України визнано необхідним обмежувати перенапруги при планових включеннях ліній у мережах середньовисокої напруги.

Для цих мереж у комплекс захисних заходів входять: секціонування далеких ліній на ділянки довжиною до 250...300 км та встановлення шунтуючих реакторів на лініях, а також підключення розрядників комбінованого типу, які одночасно виконують функції захисту від грозових та від комутаційних перенапруг.

Окрім перелічених заходів, передбачається використання шунтуючих опорів у вимикачах та розглядається можливість синхронного включення ліній. Досвід експлуатації показує, що такі заходи забезпечують досить ефективний захист від комутаційних перенапруг при планових включеннях ліній.

Якщо говорити про лінії 110 кВ, то найкращим варіантом вирішення питання запобігання перенапруг є використання ОПН [25]. Тому для магістральних районних електричних мереж рекомендується встановлювати обмежувачі перенапруг серії ОПНп-110/73/10/550. Загальний вид ОПН та реєстратора спрацювань показано на рис. 2.3, а технічні параметри пристрою наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики ОПНп-110/73/10/550

Показник	Норма
Номинальна напруга мережі, кВ	110
Найбільша робоча напруга мережі, кВ	126
Частота мережі, Гц	50
Найбільша тривало допустима робоча напруга, кВ	73
Номинальна напруга обмежувача, кВ	91,25
Номинальний розрядний струм з формою хвилі 8/20 мкс, кА	10
Пропускна спроможність обмежувача (2000 мкс), А	550
Кліматичне виконання по ГОСТ 15150	УХЛ
Категорія розміщення по ГОСТ 15150	1
Температурний діапазон експлуатації	-60°C ... +60°C
Механічне навантаження від тяжіння проводів в горизонтальному напрямі, Н, не менше	1000
Енергоємність не менше, кДж/кВ	6,4

#### 2.4. Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу способів і засобів боротьби з комутаційними перенапругами можна зробити наступні висновки:

1. Засобами фіксації та вимірювання комутаційних перенапруг є варистори, які є основним елементом обмежувачів перенапруг (ОПН). Перенапруги при відключенні індуктивних елементів мережі виявляються за швидким примусовим зниженням («відключенням») струму дуги в автоматичному вимикачі.

2. Досліджено способи зниження комутаційних перенапруг. Основні способи зниження комутаційних перенапруг: обмеження вимушеної складової комутаційних перенапруг і послаблення перехідної складової комутаційного процесу при включенні ліній.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ РАЙОННОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ ПРИ ВИНИКНЕННІ КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ

#### 3.1. Аналіз впливу довжини лінії на величину перенапруг

Для дослідження впливу протяжності ЛЕП на величину комутаційних перенапруг у програмному комплексі MATLAB Simulink була складена модель, представлена на рисунку 3.1.

Модель досліджуваної електричної мережі складається з таких основних пристроїв:

- джерело електроенергії (Three-Phase Source);
- лінія електропередачі (Three-Phase PI Section Line);
- комутаційний пристрій (Three-Phase Breaker).

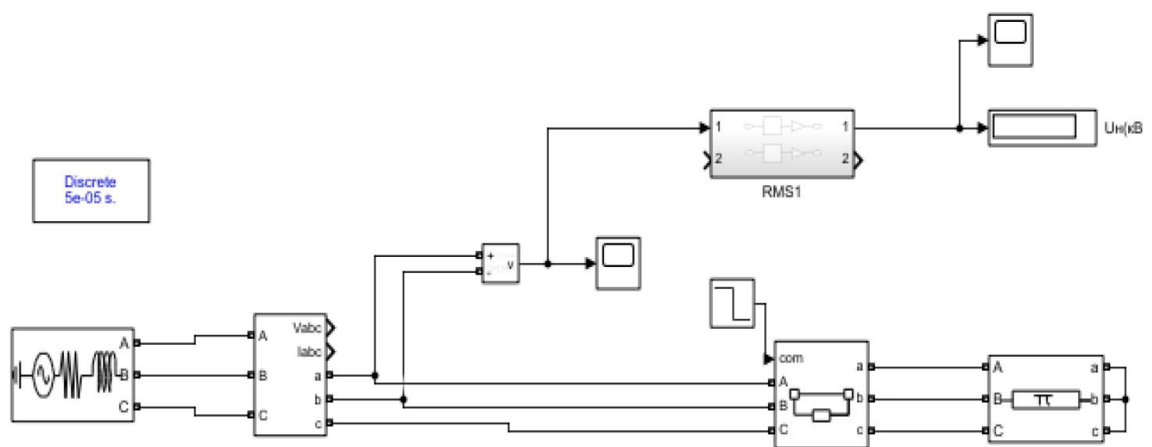


Рис. 3.1. Імітаційна модель мережі 110 кВ для холостого ходу

Результати моделювання для лінії довжиною 10 кілометрів та робочою напругою 110 кВ показано на рис. 3.2.

Аналогічні дослідження проведені також при інших довжинах лінії. Отримані результати зведені в таблицю 3.1, де  $U_1$  — величина напруги до комутації, а  $U_2$  — величина напруги після комутації.

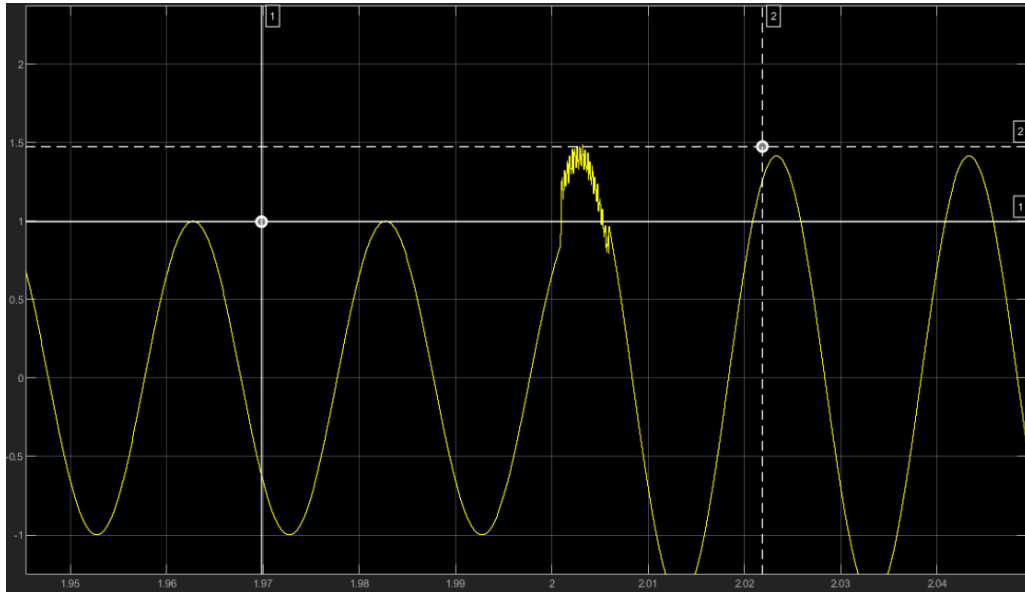


Рис. 3.1. Графік перенапруги при комутації лінії довжиною 10 км при роботі без навантаження

Таблиця 3.1. Результати моделювання впливу довжини ЛЕП на величину комутаційних перенапруг

За результатами таблиці 3.1 побудовано графік залежності величини комутаційних перенапруг від довжини лінії (рис. 3.3).

Аналіз рис. 3.3. показує, що зі збільшенням довжини лінії електропередачі величина комутаційних перенапруг збільшується. Зі збільшенням довжини лінії електропередач зростають індуктивний опір та хвильові процеси, що призводить до більш високих комутаційних перенапруг.

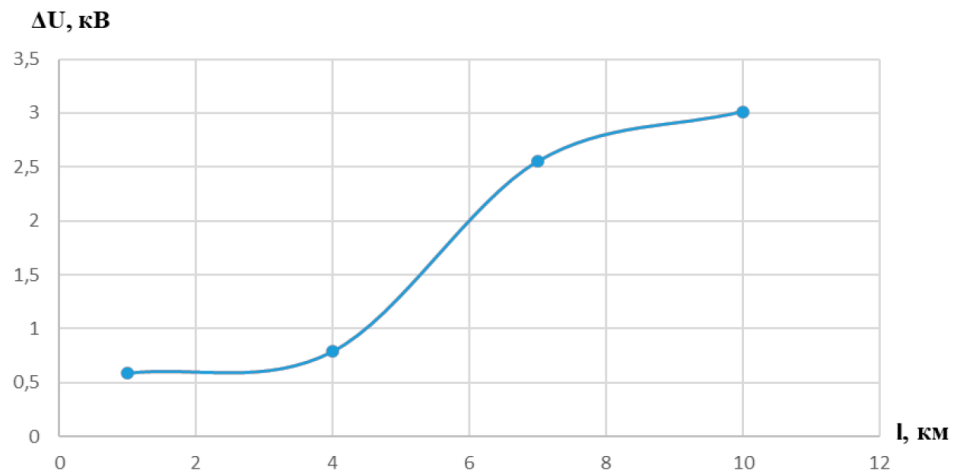


Рис. 3.3. Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі

### 3.2. Аналіз впливу активного навантаження на величину комутаційних перенапруг

Для дослідження впливу активного навантаження на рівень комутаційних перенапруг було створено модель у MATLAB SIMULINK, зображену на рисунку 3.4.

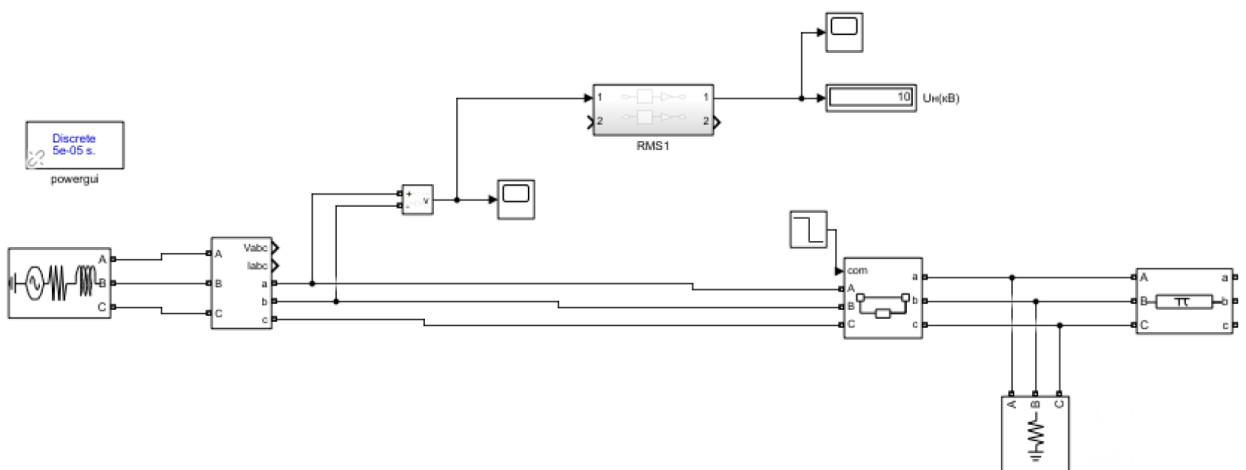


Рис. 3.4. Імітаційна модель мережі 110 кВ з активним навантаженням

Модель електричної мережі включає такі основні компоненти: джерело електроживлення (Three-Phase Source), лінія електропередачі (Three-Phase PI

Section Line), комутаційний пристрій (Three-Phase Breaker) та навантаження (Three-Phase Series RLC Load).

Результати моделювання для лінії завдовжки 10 км, робочої напруги  $U_{роб} = 110$  кВ та активного навантаження  $P_H = 6$  МВт наведені на рисунку 3.5.

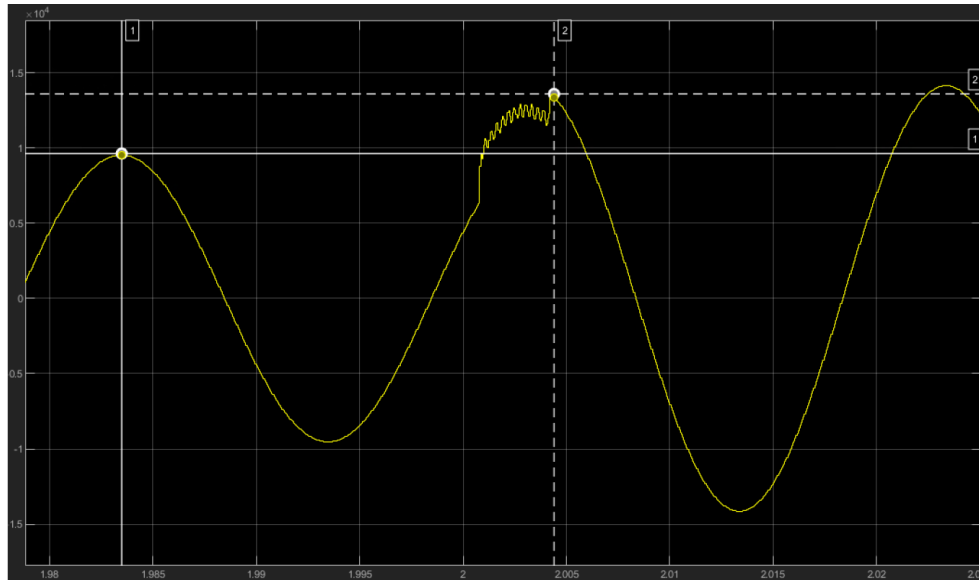


Рис. 3.5. Рівень комутаційної перенапруги для лінії довжиною 10 км, робочою напругою 110 кВ та активним навантаженням 6 МВт

Дослідження також проведено для різних довжин ліній, а отримані дані подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Результати моделювання впливу довжини ЛЕП на величину комутаційних перенапруг при активному навантаженні 6 МВт

На основі результатів з таблиці 3.2 побудовано графік залежності комутаційних перенапруг від довжини лінії, що зображений на рисунку 3.6.

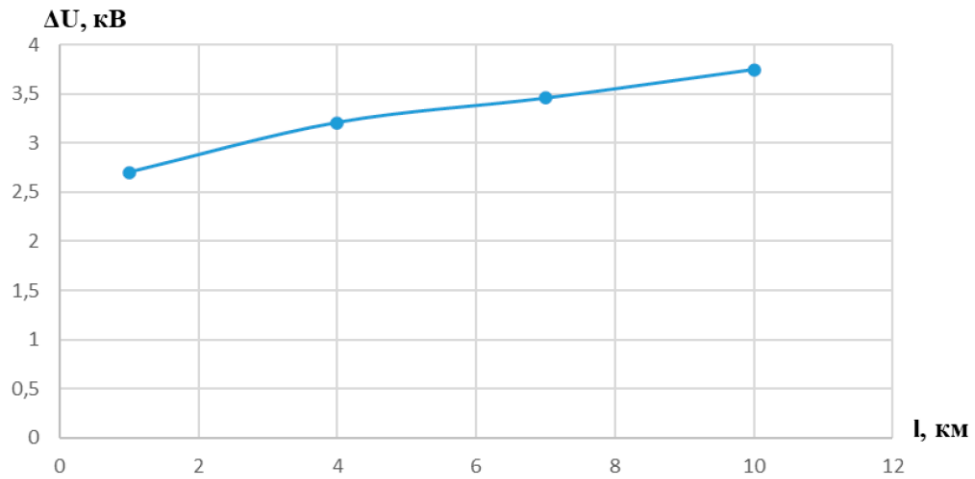


Рис. 3.6. Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при активному навантаженні 6 МВт

Аналізуючи результати рис. 3.6 можна зробити висновок, що при роботі лінії з активним навантаженням при збільшенні довжини лінії рівень перенапруг комутаційних зростає. При цьому, слід відмітити, що при роботі з навантаженням 6 МВт рівень перенапруг значно вищий, ніж при роботі на холостому ході.

### **3.3. Аналіз впливу реактивного навантаження на величину комутаційних перенапруг**

Рис. 3.7. Імітаційна модель мережі 110 кВ з реактивним навантаженням

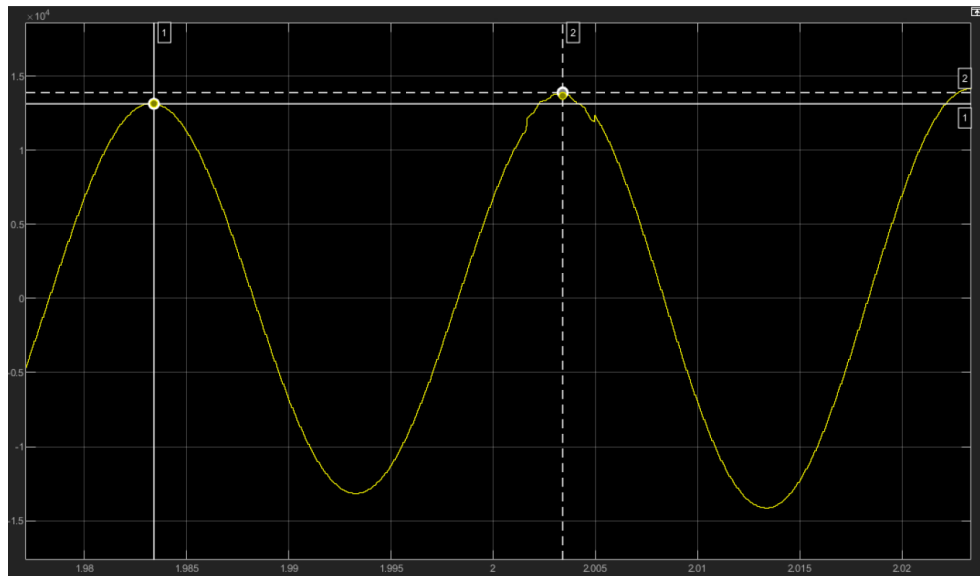


Рис. 3.8. Рівень комутаційної перенапруги для лінії довжиною 10 км, робочою напругою 110 кВ та реактивним навантаженням 3 МВт

Подібні дослідження виконано для інших довжин ліній, а результати підсумовано в таблиці 3.3. На основі даних з таблиці 3.3 був побудований графік, що показує залежність комутаційних перенапруг від довжини лінії, як видно на рисунку 3.9.

Таблиця 3.3. Результати моделювання впливу довжини ЛЕП на величину комутаційних перенапруг при реактивному навантаженні 3 МВт

Довжина лінії, км	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$\Delta U$ , кВ
1	113,195	113,632	0,437
4	113,163	113,732	0,569
7	113,135	113,736	0,601
10	113,135	113,897	0,762

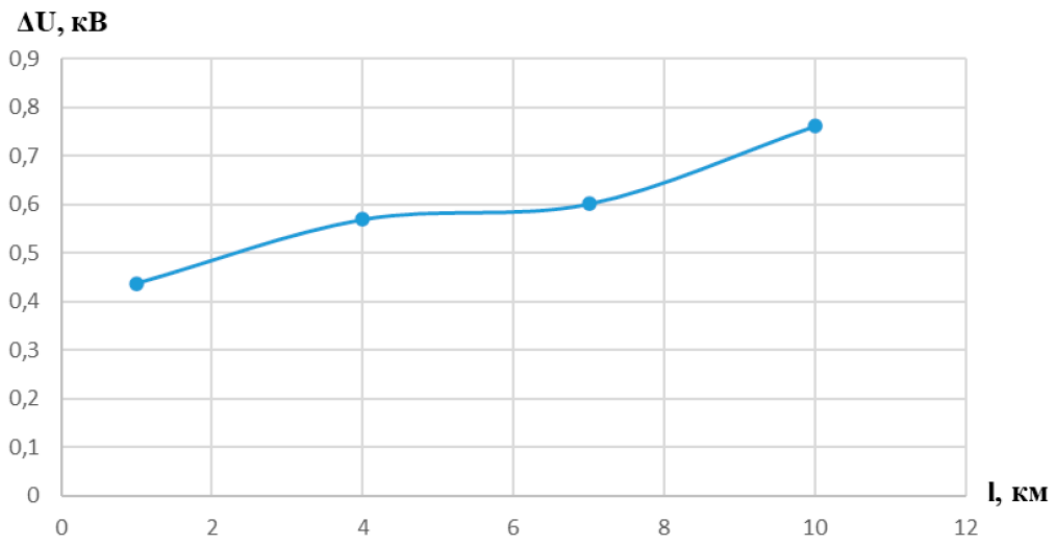


Рис. 3.9. Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при реактивному навантаженні 3 мВт

Аналізуючи результати рис. 3.9 можна зробити висновок, що при роботі лінії з реактивним навантаженням при збільшенні довжини лінії рівень перенапруг комутаційних зростає. При цьому, слід відмітити, що при роботі з активним навантаженням рівень перенапруг значно вищий, ніж при роботі лінії з реактивним навантаженням.

### 3.4. Висновки до розділу

Проведено імітаційне моделювання роботи лінії електропередачі напругою 110 кВ при виникненні комутаційних перенапруг при різних режимах роботи: на холостому ході, з активним та реактивним навантаженням.

Встановлено, що при роботі лінії з реактивним навантаженням при збільшенні довжини лінії рівень перенапруг комутаційних зростає. Водночас при роботі з активним навантаженням рівень перенапруг значно вищий, ніж при роботі лінії з реактивним навантаженням.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### **Організація охорони праці при роботі з обмежувачами перенапруг.**

Відповідальність за охорону праці при виконанні робіт з обмежувачами перенапруг на підстанції покладається на керівника підрозділу, а також безпосередніх виконавців робіт. Керівник зобов'язаний забезпечити умови для безпечного виконання робіт, організувати своєчасний інструктаж та навчання персоналу, який працює з обмежувачами перенапруг, та контролювати дотримання працівниками правил охорони праці. Також він відповідає за забезпечення робочих місць необхідними засобами захисту, інструментами, технікою безпеки та засобами індивідуального захисту [26-28].

Працівники, які займаються обслуговуванням або ремонтом підстанцій, повинні проходити декілька видів інструктажів і навчань. Спершу всі працівники проходять вступний інструктаж з охорони праці, який надає базові знання щодо безпеки на робочому місці, а також інформацію про специфіку роботи на підстанціях. Потім здійснюється первинний інструктаж безпосередньо на робочому місці, де обговорюються конкретні заходи безпеки при роботі з обмежувачами перенапруг та іншим електротехнічним обладнанням. Додатково, працівники проходять повторні інструктажі, які проводяться регулярно для закріплення знань, а також позапланові інструктажі при зміні робочих умов або після аварійних ситуацій.

Особливу увагу приділяють спеціальному навчанні, яке включає ознайомлення з потенційними небезпеками електроустановок та засобами їх мінімізації. Після цього працівники здають кваліфікаційний іспит, що підтверджує їхню готовність до роботи на підстанціях, а також проходять перевірку знань з охорони праці не рідше одного разу на рік..

**Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при роботі з обмежувачами перенапруг.** Робота з обмежувачами перенапруг є

специфічною через низку шкідливих та небезпечних факторів, які можуть суттєво вплинути на здоров'я та безпеку працівників, а також на якість виконання робіт [31, 32]. Одним із ключових небезпечних факторів є ризик ураження електричним струмом. Високовольтне обладнання підстанцій, зокрема обмежувачі перенапруг, працює під великими напругами, що може створити загрозу для життя. Контакт зі струмоведучими частинами або недостатня ізоляція можуть призвести до електричних опіків, зупинки серця або навіть смертельних наслідків. Особливо небезпечні ситуації виникають під час проведення ремонтних робіт, коли обмежувачі можуть бути частково заряджені залишковою напругою, що потребує додаткових запобіжних заходів.

Додатковою загрозою є ризик виникнення електричної дуги, яка може статися під час короткого замикання чи інших аварійних ситуацій. Електрична дуга характеризується високою температурою і яскравим світлом, що може призвести до серйозних опіків шкіри та пошкоджень очей. Крім цього, утворення електричної дуги може спричинити вибух, якщо в атмосфері є леткі гази, зокрема при несправності обладнання чи порушенні умов роботи.

Фізичні навантаження також є важливим фактором, який слід враховувати. Робота з обмежувачами перенапруг передбачає виконання важких і точних монтажних робіт, що потребує витривалості, сили та обережності. Часто роботи проводяться в незручних або обмежених умовах, зокрема на висоті, що підвищує ризик отримання травм, наприклад, падіння чи перекидання важких елементів. Через такі умови зростає ризик розтягнень, пошкоджень суглобів, а також тривалого навантаження на спину та хребет.

Ще одним важливим аспектом є психофізіологічні фактори. Під час роботи з високовольтними установками необхідна максимальна концентрація уваги, оскільки будь-яка помилка може призвести до серйозних наслідків. Постійна напруга та робота в умовах високого стресу знижують швидкість

реакції, підвищують рівень тривожності і втоми, а також можуть призвести до професійного вигоряння. Психологічний тиск часто посилюється, коли робота проводиться в екстремальних умовах або при несправності обладнання. Такі стресові ситуації можуть викликати підвищений артеріальний тиск, головний біль, порушення сну та загальне зниження працездатності.

Робота з обмежувачами перенапруг також передбачає перебування поруч із джерелами шуму і вібрації, що є типовими для високовольтних підстанцій та обладнання з великими потужностями. Постійний вплив шуму негативно впливає на слуховий апарат, може викликати головний біль, швидке виснаження та знижує ефективність роботи. Вібрації, які передаються через обладнання та конструкції, здатні спричинити перенапруження м'язів, особливо в умовах тривалого впливу, а також посилювати ризик суглобових і кісткових захворювань у майбутньому.

Таким чином, шкідливі та небезпечні фактори при роботі з обмежувачами перенапруг вимагають особливих заходів з охорони праці, щоб забезпечити максимальну безпеку працівників..

**Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з обмежувачами перенапруг.** Для забезпечення безпечних умов праці при роботі з обмежувачами перенапруг необхідно впроваджувати комплексні заходи, що охоплюють організаційні, технічні та психологічні аспекти роботи. Перш за все, слід розробити та впровадити чіткі інструкції щодо виконання робіт з обмежувачами перенапруг, враховуючи специфіку кожної операції та можливі ризики. Керівники підрозділів повинні забезпечити працівників повною інформацією про потенційні небезпеки і забезпечити регулярне проведення інструктажів та навчальних сесій. Важливо, щоб працівники пройшли відповідне навчання і періодично складали іспити для перевірки знань щодо роботи з високовольтним обладнанням.

З технічного боку, робоче місце повинно бути обладнане всіма необхідними засобами захисту, як індивідуальними, так і колективними. До

індивідуальних засобів належать захисні костюми, рукавички, ізолюючі накладки, спеціальне взуття, а також засоби захисту для очей та обличчя. Колективні засоби захисту повинні включати надійні огорожі, попереджувальні знаки, заземлення, а також аварійні пристрої для знеструмлення обладнання у разі небезпечної ситуації. Для зменшення ризику впливу електромагнітних полів необхідно використовувати захисні екрани або розташовувати робочі місця на безпечній відстані від джерел випромінювання.

Важливим аспектом є контроль за психофізіологічним станом працівників. Необхідно регулярно проводити медичні огляди та психологічне тестування, щоб вчасно виявляти ознаки стресу, втоми або емоційного виснаження, що може впливати на якість роботи. Окрім цього, рекомендується надавати працівникам доступ до послуг психологів або консультування з питань профілактики стресу, що дозволить підтримувати високий рівень уважності та мотивації під час роботи з небезпечним обладнанням.

Для мінімізації впливу шуму та вібрації варто застосовувати обладнання з низьким рівнем шуму або вібраційними характеристиками, а також забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту слуху, такими як спеціальні навушники або беруші. Регулярний технічний огляд обладнання також допоможе знизити рівень шуму та вібрацій, а, отже, і ризик для здоров'я працівників.

Таким чином, впровадження безпечних умов праці при роботі з обмежувачами перенапруг передбачає інтегрований підхід, де кожний із зазначених аспектів є частиною єдиної системи охорони праці. Це сприятиме зниженню рівня травматизму та забезпеченню здоров'я і безпеки працівників у процесі роботи..

## 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Використання обмежувачів перенапруг типу ОПН у розподільчих електричних мережах є економічно доцільним через здатність цих пристроїв ефективно запобігати перенапругам, які виникають у мережах під час грозових явищ, комутацій та інших подій, що призводять до стрибків напруги. ОПН дозволяють суттєво знизити ризик пошкодження дороговартісного обладнання, такого як трансформатори, вимикачі, ізолятори та кабельні лінії, забезпечуючи його тривалий термін служби та скорочення витрат на технічне обслуговування і ремонт.

Скорочення витрат на ремонт і технічне обслуговування стає особливо помітним. У мережах середньої напруги кількість пошкоджень обладнання завдяки застосуванню ОПН може знижуватись на 40–60%. Зменшення кількості аварійних випадків дозволяє знизити витрати на відновлення і заміну обладнання [22, 24]. У разі використання ОПН значна частка цих витрат вдається уникнути, оскільки обладнання краще захищене від перенапруг.

Ще один важливий фактор економічної ефективності ОПН — зниження непрямих витрат, пов'язаних з аварійними відключеннями та перебоями в електропостачанні. В середньому, стабільна робота мережі, де використовуються ОПН, забезпечує меншу кількість відключень, що знижує загальні втрати електроенергії на 10–15% через мінімізацію частоти переривань електропостачання. Це сприяє підвищенню надійності енергопостачання для споживачів, що, своєю чергою, позитивно впливає на прибутковість підприємств і надає їм можливість уникнути витрат на компенсацію за простої чи недопоставку електроенергії.

**Висновки до розділу.** Отже, використання обмежувачів перенапруг типу ОПН у розподільчих електричних мережах є економічно доцільним і стратегічно важливим рішенням, яке дозволяє значно підвищити надійність

та безпеку системи. ОПН ефективно знижують рівень перенапруг на 30–50%, що зменшує частоту пошкоджень обладнання на 40–60% і відповідно скорочує витрати на його ремонт і заміну. Завдяки цьому зменшуються операційні витрати на технічне обслуговування до 25%, а також забезпечується тривалий термін служби електромереж. Таке покращення надійності дозволяє знизити втрати електроенергії на 10–15%, що сприяє безперебійному енергопостачанню та скороченню витрат на компенсації за простої. В цілому, впровадження ОПН не лише підвищує захист мереж та обладнання, а й сприяє суттєвій економії для підприємств, покращуючи ефективність та стабільність енергосистеми.

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано поняття перенапруг. Перенапруги характеризуються ненормальним функціонуванням електричних мереж, при якому напруга підвищується вище допустимих значень на окремих ділянках мережі, що може бути небезпечним для апаратури. Встановлено, що причинами їх виникнення можуть бути різкі зміни навантаження на лінії електропередач, явища ферорезонансу та експлуатація мереж в аварійних умовах. Складено класифікацію комутаційних перенапруг.

Проведено імітаційне моделювання роботи лінії електропередачі напругою 110 кВ при виникненні комутаційних перенапруг при різних режимах роботи: на холостому ході, з активним та реактивним навантаженням. Встановлено, що зі збільшенням довжини лінії електропередачі величина комутаційних перенапруг збільшується. Зі збільшенням довжини лінії електропередачі зростають індуктивний опір та хвильові процеси, що призводить до більш високих комутаційних перенапруг.

Виявлено, що при роботі лінії з активним навантаженням при збільшенні довжини лінії рівень перенапруг комутаційних зростає. При цьому, слід відмітити, що при роботі з навантаженням рівень перенапруг значно вищий, ніж при роботі на холостому ході. Встановлено, що при роботі лінії з реактивним навантаженням при збільшенні довжини лінії рівень перенапруг комутаційних зростає. Водночас при роботі з активним навантаженням рівень перенапруг значно вищий, ніж при роботі лінії з реактивним навантаженням.

Виявлено, що використання обмежувачів перенапруг типу ОПН у розподільчих електричних мережах є економічно доцільним і стратегічно важливим рішенням, яке дозволяє значно підвищити надійність та безпеку системи. ОПН ефективно знижують рівень перенапруг на 30–50%, що

зменшує частоту пошкоджень обладнання на 40–60% і відповідно скорочує витрати на його ремонт і заміну.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Буров, В. М. Електричні мережі та системи: Основи захисту від перенапруг: Навч. посібник / В. М. Буров, О. А. Лебедев. – Київ: Вища школа, 2018. – 240 с.
2. Кругляк, Б. С. Основи експлуатації електричних мереж / Б. С. Кругляк. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 315 с.
3. Нові методи захисту електричних мереж від перенапруг / Ю. М. Носов, В. І. Лук'яненко. – Харків: ХНУ, 2020. – 210 с.
4. Kim, H., Lee, S. Financial Impact of Surge Arrester Application in Distribution Systems / H. Kim, S. Lee // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35, No. 4. – P. 1587–1595.
5. ДСТУ EN 60099-4:2018. Захист від перенапруг. Обмежувачі перенапруг для розподільних мереж – [Чинний від 2018-07-01]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 48 с.
6. Павлюк, П. В. Економічна ефективність використання обмежувачів перенапруг у середніх мережах / П. В. Павлюк, О. В. Демченко // Вісник Київського політехнічного інституту. – 2020. – № 1. – С. 47–52.
7. Клименко, А. М. Технічний захист електроенергетичних систем від перенапруг / А. М. Клименко, В. Г. Мороз // Технічна електродинаміка. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 102–110.
8. IEEE Guide for the Application of Surge Arresters in Power Systems. – New York: IEEE, 2018. – 105 p.
9. Технічне забезпечення захисту електричних мереж від перенапруг / В. К. Остренко, С. С. Гончаренко. – Київ: Енергетика, 2021. – 275 с.
10. Власюк, М. В. Обмежувачі перенапруг: досвід та перспективи застосування в Україні / М. В. Власюк, Т. О. Суханова // Електроенергетика та електротехніка. – 2020. – № 3. – С. 21–28.

11. Таран, Ю. О. Підвищення надійності електричних мереж з використанням ОПН / Ю. О. Таран // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2019. – Вип. 189. – С. 132–137.
12. Козаченко, І. Г. Вплив обмежувачів перенапруг на експлуатаційні витрати електричних мереж / І. Г. Козаченко, О. П. Кравчук // Техніка та енергетика. – 2018. – № 4. – С. 67–73.
13. Siemens Energy. Surge Arresters for Power Distribution Networks: Technical Documentation. – Berlin: Siemens AG, 2019. – 85 p.
14. Petrenko, O. Assessment of Surge Protection Devices in Medium Voltage Grids / O. Petrenko, V. Marchenko // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2022. – Vol. 134. – P. 107–114.
15. Слободян, Д. А. Сучасні методи захисту від перенапруг у розподільних мережах / Д. А. Слободян, О. В. Воробей // Науковий вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2021. – № 51. – С. 120–126.
16. Андреев, М. М. Надійність електричних мереж та їх захист / М. М. Андреев. – Київ: Наука, 2020. – 350 с.
17. Дьяків, В. М. Економічна оцінка надійності енергетичних систем / В. М. Дьяків, І. П. Кравчук. – Львів: Видавничий центр ЛНУ, 2021. – 185 с.
18. Zhou, J., et al. Review of Surge Arrester Application and Economic Benefits in Power Distribution Systems / J. Zhou, L. Wang, Y. Li // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – Vol. 35, No. 1. – P. 94–102.
19. Назаренко, І. О. Управління ризиками та економічне обґрунтування впровадження обмежувачів перенапруг у мережах / І. О. Назаренко // Енергетика та енергозбереження. – 2020. – № 2. – С. 55–61.
20. Міньков, П. Г. Технічне забезпечення надійності електричних мереж / П. Г. Міньков. – Одеса: ОНУ, 2020. – 268 с.
21. Ващенко, Р. І. Методи прогнозування пошкоджень обладнання через перенапруги / Р. І. Ващенко, С. В. Ковальчук // Науково-технічний вісник

Національного університету "Львівська політехніка". – 2021. – № 15. – С. 45–51.

22. Daniele, F., et al. Economic Impact of Surge Arresters in Power Distribution Networks: A Case Study / F. Daniele, G. Martínez, R. Fernández // *Energy Economics*. – 2022. – Vol. 94. – P. 136–144.

23. Мацкевич, І. Ю. Проблеми та перспективи застосування ОПН в Україні / І. Ю. Мацкевич // *Електричний транспорт і енергетика*. – 2020. – № 4. – С. 59–65.

24. Lin, Q., Li, Z. Cost-Benefit Analysis of Surge Arresters in Medium Voltage Networks / Q. Lin, Z. Li // *Journal of Electrical Engineering & Technology*. – 2021. – Vol. 16, No. 3. – P. 1235–1242.

25. Ніколаєнко, О. М. Аналіз економічної ефективності використання обмежувачів перенапруг в енергетичних мережах / О. М. Ніколаєнко, П. В. Шевченко // *Наукові праці Інституту енергетики*. – 2020. – Т. 33, № 2. – С. 33–40.

26. Закон України "Про охорону праці" від 14 жовтня 1992 р. (Редакція станом на 20.01.2018).

27. Полетаєв В.П. Охорона праці в галузі: навчальний посібник / В.П. Полетаєв, О.А. Крюковська / під ред. д.т.н., проф. А.П. Огурцова. — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. — 363с.

28. ISO 45001 «Система менеджменту охорони здоров'я та безпеки персоналу. Вимоги»

29. ДСТУ ОHSAS 18002:2015 Національний стандарт України системи управління гігієною та безпекою праці - Видання офіційне – Київ ДП «УкрНДНЦ». 2016

30. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві затверджені наказом Мінсоцполітики від 29.08.2018 № 1240.

31. О. В. Войналович, Є. І. Марчишина Охорона праці у сільському господарстві. Навчальний посібник. - К.2019 – 691 с.