

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**бакалавр**

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Комутаційні перенапруги та способи їх зниження в електричних мережах**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТс-41  
спеціальнос  
ті 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Кужіль І.З.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Філюк Я.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач  
кафедри Коваль В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Микитишин А.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« 02 » січня 2026 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Кужілю Івану Захаровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комутаційні перенапруги та способи їх зниження в електричних мережах

Керівник роботи ... Філюк Я.О., к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 31 » Грудня 2025 року № 4/7-1164

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи провести аналіз причин виникнення комутаційних перенапруг в електричних мережах, дослідити їх вплив на роботу електрообладнання та розробити рекомендації щодо застосування ефективних способів і засобів їх зниження та обмеження.

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Кужіль І.З.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Філюк Я.О.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41 - Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.63; рис.37 ; табл.6 ; джерел 13; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Комутаційні перенапруги та способи їх зниження в електричних мережах».

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз причин виникнення комутаційних перенапруг і способів їх зниження в електричних мережах.

У першому розділі розглянуто теоретичні основи комутаційних перенапруг, їх класифікацію, причини виникнення та вплив на роботу електроенергетичного обладнання. Також проаналізовано основні фактори, що спричиняють появу перенапруг у електричних мережах.

У другому розділі досліджено сучасні способи та засоби зниження комутаційних перенапруг, виконано аналіз їх принципів роботи та ефективності застосування. Проведено порівняльну оцінку технічних рішень щодо захисту електрообладнання від перенапруг.

У третьому розділі за допомогою середовища MATLAB Simulink виконано моделювання електричної мережі та досліджено вплив довжини лінії, робочої напруги і характеру навантаження на величину комутаційних перенапруг. На основі отриманих результатів визначено основні закономірності зміни рівня перенапруг та оцінено ефективність їх обмеження

*Ключові слова:* комутаційні перенапруги, електричні мережі, перехідні процеси, обмежувачі перенапруг, MATLAB Simulink.

# ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Комутаційні перенапруги. Основні поняття і визначення	8
1.2 Класифікація комутаційних перенапруг	11
1.3 Причини та наслідки виникнення комутаційних перенапруг	12
1.4 Висновки до розділу	20
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	21
2.1 Засоби фіксації та вимірювання комутаційних перенапруг	21
2.2 Способи боротьби з комутаційними перенапругами	23
2.3 Засоби боротьби з комутаційними перенапругами	25
2.4 Оцінка ефективності існуючих способів і засобів обмеження комутаційних перенапруг	30
2.5 Висновки до розділу	37
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	39
3.1 Вплив різних факторів на величини комутаційних перенапруг	39
3.2 Дослідження впливу величини робочої напруги в вузлах електричної мережі на величину комутаційних перенапруг	43
3.3 Дослідження впливу величини навантаження на величину комутаційних перенапруг	45
3.4 Висновки до розділу	54
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	55

4.1	Заходи безпеки при монтажі енергоустановок	55
4.2	Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В	57
4.3	Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання	59
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	61
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62

## ВСТУП

Електроенергетичні системи є основою функціонування сучасної промисловості, транспорту, комунального господарства та побутового сектору. Надійність їх роботи значною мірою визначається здатністю електричних мереж і обладнання витримувати різноманітні аварійні та перехідні режими. Одним із найбільш поширених і небезпечних явищ, що виникають під час експлуатації електроенергетичних систем, є комутаційні перенапруги.

Комутаційні перенапруги виникають під час вмикання та вимикання ліній електропередачі, трансформаторів, електродвигунів, конденсаторних батарей, реакторів та іншого електротехнічного обладнання. Внаслідок швидкої зміни струмів і напруг у колах з індуктивними та ємнісними елементами виникають перехідні електромагнітні процеси, які супроводжуються короткочасним підвищенням напруги. У деяких випадках величина таких перенапруг може у декілька разів перевищувати номінальну напругу мережі, створюючи небезпеку для ізоляції обладнання та нормального функціонування електроустановок.

Особливо актуальною проблема комутаційних перенапруг є в сучасних умовах розвитку електроенергетики, коли постійно зростає протяжність ліній електропередачі, збільшується потужність електрообладнання та впроваджуються нові технології керування режимами роботи мереж. Одночасно підвищуються вимоги до надійності електропостачання та безаварійної роботи електрообладнання. Навіть короткочасні перенапруги можуть спричиняти прискорене старіння ізоляції, пробої ізоляційних проміжків, пошкодження електронних пристроїв керування та захисту, а також аварійні відключення окремих елементів енергосистеми.

Для забезпечення надійної роботи електричних мереж застосовуються різноманітні способи зниження комутаційних перенапруг, серед яких використання нелінійних обмежувачів перенапруг, вакуумних та елегазових вимикачів, шунтувальних резисторів, струмообмежувальних реакторів, RC-ланцюгів та систем керованої комутації. Ефективність кожного із цих способів залежить від параметрів

мережі та режимів її роботи, тому важливим завданням є дослідження впливу різних факторів на рівень перенапруг і вибір найбільш ефективних засобів захисту.

Таким чином, дослідження комутаційних перенапруг та способів їх зниження в електричних мережах є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення надійності роботи електроенергетичних систем, забезпечення довговічності електрообладнання та зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз причин виникнення комутаційних перенапруг і способів їх зниження в електричних мережах.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- виконати аналіз існуючих способів і технічних засобів зниження комутаційних перенапруг та оцінити ефективність сучасних обмежувачів перенапруг та інших захисних пристроїв;
- розробити імітаційні моделі електричної мережі в середовищі MATLAB Simulink і дослідити вплив довжини лінії електропередачі на величину комутаційних перенапруг;
- визначити вплив робочої напруги мережі на рівень перенапруг та дослідити вплив активного, реактивного та активно-реактивного навантаження на параметри перехідних процесів;
- проаналізувати результати моделювання та сформулювати рекомендації щодо вибору ефективних способів зниження комутаційних перенапруг в електричних мережах.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Комутаційні перенапруги. Основні поняття і визначення

Під час експлуатації електроенергетичних систем та електроустановок можуть виникати перенапруги, які здатні впливати на електричне обладнання, знижувати термін його служби та призводити до пошкодження ізоляції. Перенапругою називають короткочасне або тривале підвищення напруги понад допустимі значення, встановлені для даної електричної мережі або електрообладнання.

За місцем виникнення перенапруги діляться на внутрішні і зовнішні. Зовнішніх перенапруг належать перенапруги, джерелом яких є атмосферні явища, насамперед грозові розряди та прямі або непрямі удари блискавки. Внутрішні перенапруги виникають безпосередньо в електричних мережах і пов'язані з процесами комутації, аварійними режимами роботи або резонансними явищами. [1]

Внутрішні перенапруги можна класифікувати за причинами їх виникнення на такі основні групи:

- атмосферні перенапруги, що обумовлені впливом грозових розрядів;
- комутаційні перенапруги, які виникають під час вмикання або вимикання електрообладнання;
- перехідні перенапруги, пов'язані з електромагнітними процесами промислової частоти;
- електростатичні перенапруги, що виникають внаслідок накопичення та розряду статичної електрики.

Особливе місце серед внутрішніх перенапруг займають комутаційні перенапруги. Вони виникають під час перемикань у електричних мережах, зокрема при вмиканні або вимиканні трансформаторів, електродвигунів, конденсаторних батарей, кабельних ліній та інших елементів електроенергетичної системи. Причиною їх появи є швидка зміна струмів і потоків енергії в індуктивних та ємнісних колах, що супроводжується виникненням перехідних електромагнітних процесів.

Відповідно до вимог нормативних документів розрізняють два основні види перенапруг: імпульсні та тимчасові.

Імпульсне перенапруження характеризується різким короточасним зростанням напруги з подальшим швидким поверненням до нормального рівня. Такі перенапруги мають дуже малу тривалість, яка зазвичай не перевищує 10 мс, але можуть досягати значних амплітуд і становити небезпеку для ізоляції електрообладнання.

Тимчасове перенапруження являє собою підвищення напруги понад допустиме значення на відносно тривалий проміжок часу. Як правило, така напруга перевищує номінальне значення більш ніж на 10 % і зберігається довше ніж 10 мс. Причинами виникнення тимчасових перенапруг можуть бути аварійні режими роботи мережі, несиметрія фаз, резонансні явища або помилки комутації.

Характерні форми імпульсного та тимчасового перенапруження наведені на рисунку 1.1.

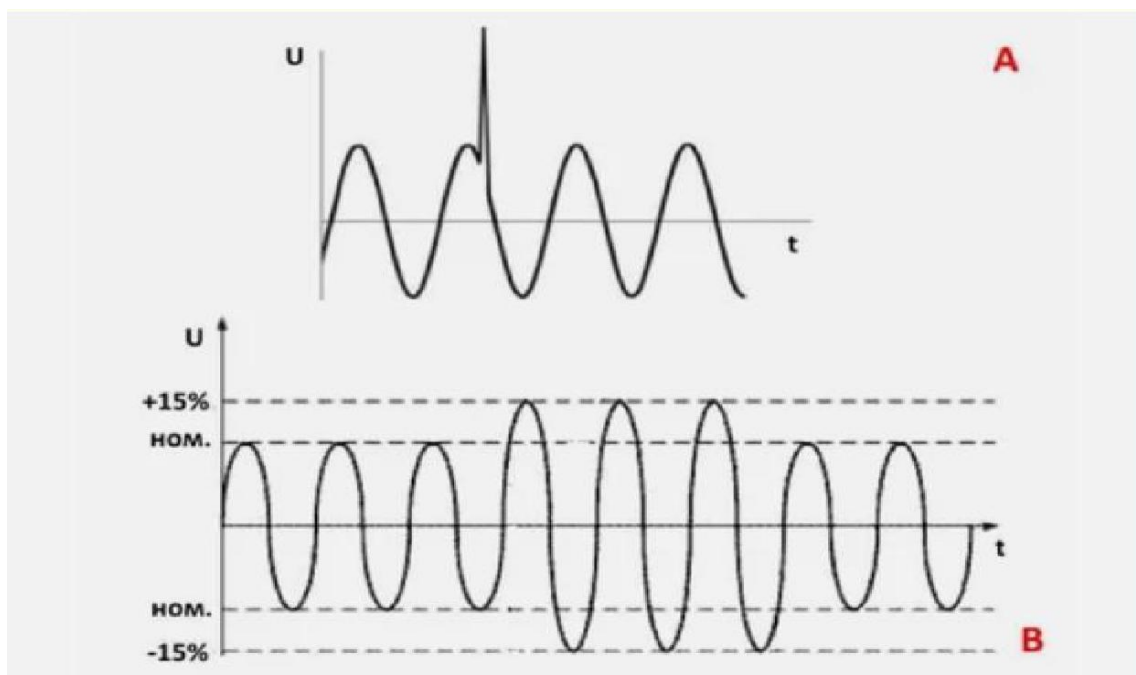


Рисунок 1.1 – Осцилограми імпульсного (А) та тимчасового (В) перенапруження в електричній мережі

Отже, всі перенапруги, що виникають в електроенергетичних системах та електроустановках, умовно поділяються на дві основні групи: зовнішні та внутрішні. [2]

До зовнішніх перенапруг належать атмосферні перенапруги, які виникають під впливом грозових розрядів. Джерелом таких перенапруг є прямі удари блискавки в елементи електричної мережі або електромагнітні впливи блискавки, що поширюються по лініях електропередачі та проникають в електроустановки. Атмосферні перенапруги характеризуються значною амплітудою та короткою тривалістю дії, що створює підвищену небезпеку для ізоляції електрообладнання.

Причиною появи внутрішніх перенапруг є перехідні електромагнітні процеси, що супроводжують вмикання та вимикання електричних кіл, перемикання силового обладнання, роботу комутаційних апаратів, а також ліквідацію аварійних пошкоджень у мережі.

Комутаційні перенапруги можуть виникати при комутації трансформаторів, електродвигунів, кабельних ліній, конденсаторних батарей та інших елементів системи електропостачання. У результаті різкої зміни струмів та напруг у колах з індуктивними і ємнісними елементами утворюються перехідні процеси, які супроводжуються короткочасним підвищенням напруги відносно її номінального значення. [3]

На рисунку 1.2 наведено типовий приклад комутаційного перенапруження. Зеленою кривою показано синусоїдальну напругу мережі в нормальному режимі роботи, тоді як синя крива відображає перехідний процес, що виникає в момент комутації. Як видно з графіка, під час перехідного процесу амплітуда напруги може суттєво перевищувати номінальне значення, що створює додаткові навантаження на ізоляцію та електронні компоненти електроустановки.

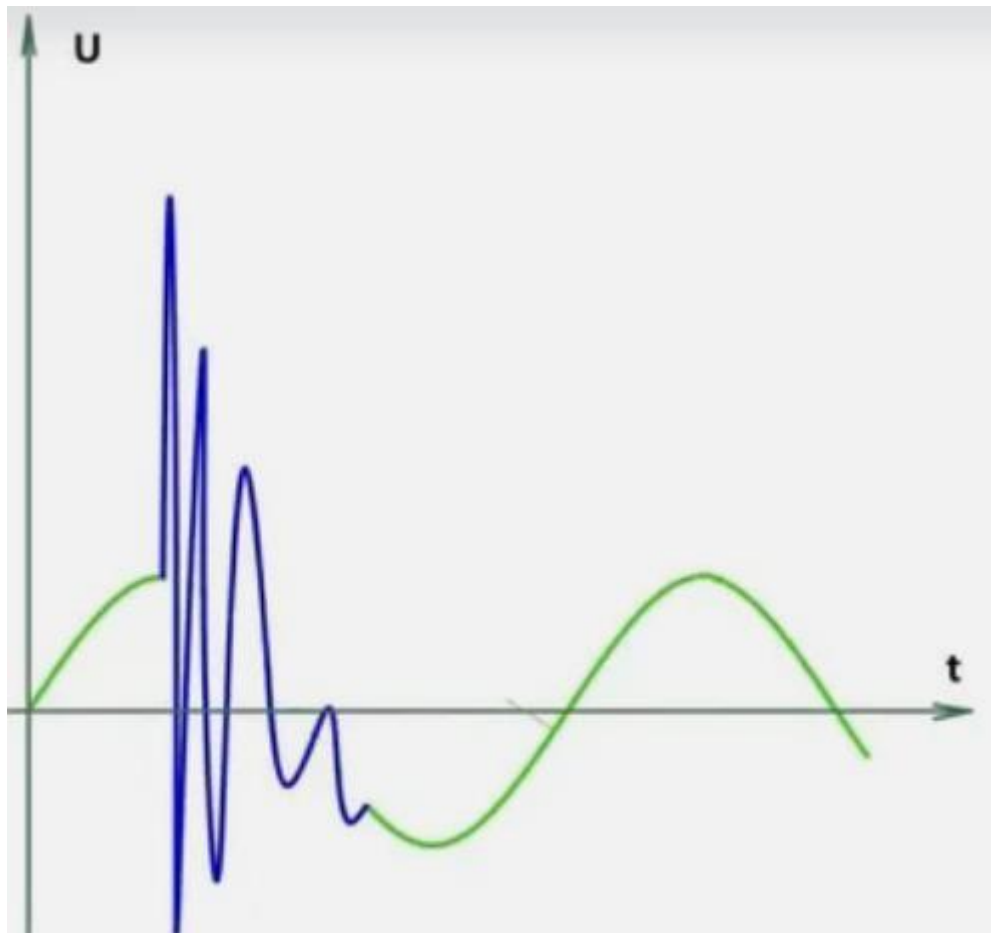


Рисунок 1.2 – Осцилограма комутаційного перенапруження в електричній мережі

## 1.2 Класифікація комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги виникають унаслідок швидких змін режимів роботи електроенергетичних систем та супроводжуються перехідними електромагнітними процесами. Основними причинами їх появи є спрацювання комутаційних апаратів під час вмикання або вимикання окремих елементів мережі, короткі замикання, пробіи ізоляції, повторні запалювання електричної дуги, а також різкі зміни параметрів нелінійних елементів електричних кіл. [4-5]

Під час виконання комутаційних операцій відбувається перерозподіл енергії, що спричиняє виникнення коливальних процесів і короткочасного підвищення напруги. Амплітуда таких перенапруг може у декілька разів перевищувати номінальне значення напруги мережі, створюючи додаткові навантаження на ізоляцію електрообладнання та знижуючи надійність його роботи.

Залежно від причин виникнення електромагнітних процесів комутаційні перенапруги поділяються на декілька основних видів. До них належать перенапруги під час вмикання та вимикання ліній електропередачі, трансформаторів, електродвигунів, конденсаторних батарей, а також перенапруги, пов'язані з аварійними режимами роботи мережі та повторними пробоями ізоляції.

Класифікацію основних видів комутаційних перенапруг наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Класифікація комутаційних перенапруг в електроенергетичних системах

### 1.3 Причини та наслідки виникнення комутаційних перенапруг

Перенапруги під час відключення або вмикання повітряних та кабельних ліній електропередачі виникають унаслідок перехідних електромагнітних процесів, що супроводжують зміну режиму роботи мережі. Вони можуть спостерігатися як під час переходу електричної системи з нормального режиму роботи до нового усталеного стану, так і при ліквідації аварійних режимів. Додатковим джерелом

перенапруг є повторне запалювання електричної дуги в контактах комутаційних апаратів. У цьому випадку кожне повторне запалювання супроводжується виникненням коливального процесу, пов'язаного з перезарядом ємностей лінії.

Практично будь-яка комутація ліній електропередачі супроводжується перехідними процесами, які можуть викликати короткочасне підвищення напруги. Для аналізу цих явищ використовують еквівалентну схему заміщення лінії у вигляді коливального  $R-L-C$  контуру, що враховує основні параметри мережі. [6]

На рисунку 1.4 наведено еквівалентний контур комутованої лінії, де  $C_e$  – сумарна ємність фази лінії відносно землі,  $L_e$  – еквівалентна індуктивність лінії та джерела живлення, а  $(R)$  – активний опір, який враховує втрати енергії в електричному колі.

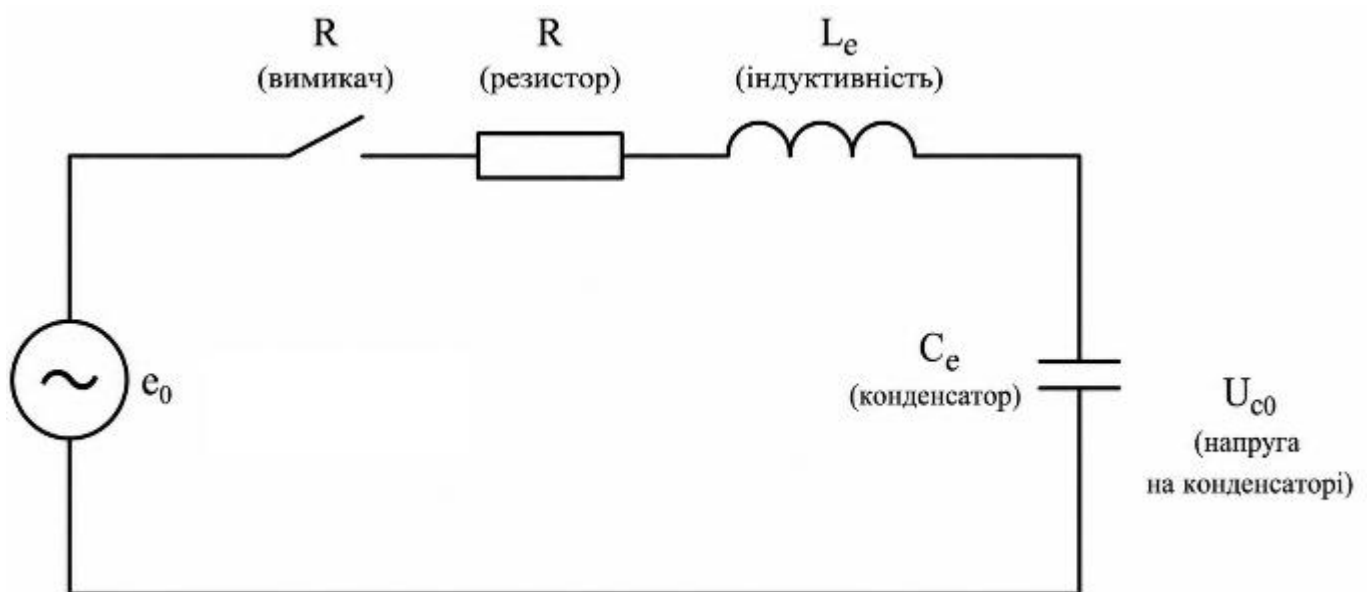


Рисунок 1.4 – Еквівалентний  $R-L_e-C_e$  контур лінії електропередачі під напругою

Активний опір вводиться до схеми для врахування затухання коливань, що виникають під час перехідних процесів. Після замикання або розмикання кола на ємності лінії виникають коливання напруги, характер яких визначається параметрами кола.

Зміна напруги на ємності комутованої фази показана на рисунку 1.5. Із наведених залежностей видно, що в процесі перезаряду ємності можуть виникати

значні коливання напруги, амплітуда яких перевищує усталене значення напруги мережі.

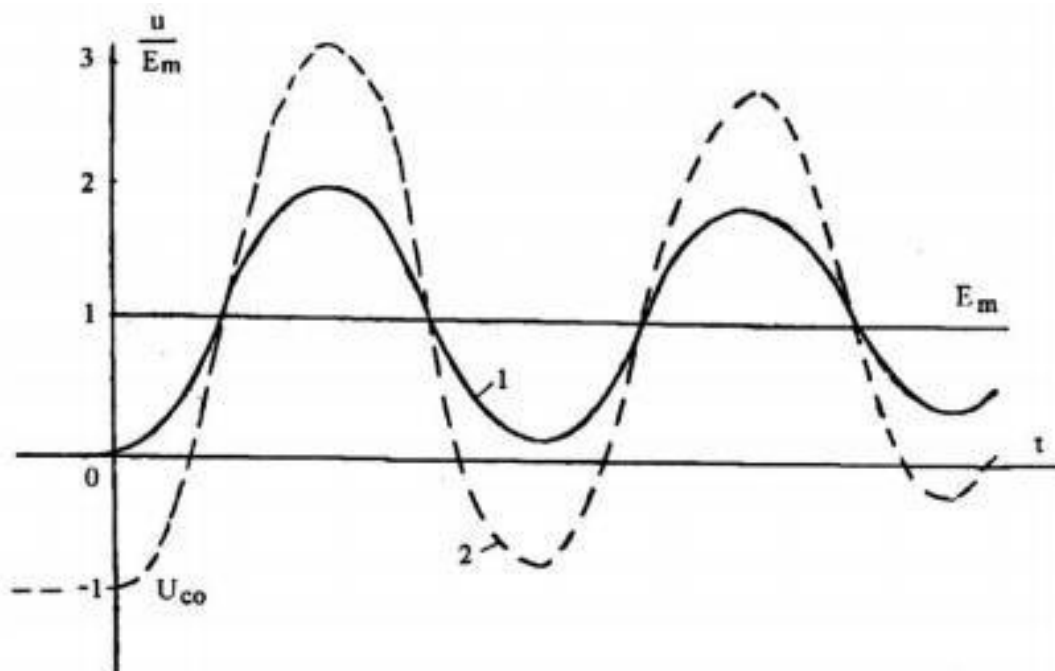


Рисунок 1.5 – Зміна напруги на ємності комутованої фази при вмиканні R–L–C контуру

Основною причиною виникнення таких перенапруг є обмін енергією між індуктивністю  $L_e$  та ємністю  $C_e$ . У результаті цього процесу формуються високочастотні коливання, частота яких може у багато разів перевищувати промислову частоту живильної мережі. Найбільші перенапруги спостерігаються під час вимкнення струмів короткого замикання, а також при відключенні ліній у режимі асинхронної роботи енергосистем. [7]

Якщо власна частота коливального контуру наближається до частоти джерела живлення, виникають умови, близькі до резонансних. У такому випадку амплітуда напруги на ємності може збільшуватися від циклу до циклу та досягати значних значень. При наближенні до резонансу усталена складова напруги поступово зростає, що призводить до підвищення рівня комутаційних перенапруг.

Характер зміни напруги на ємності коливального контуру в умовах, близьких до резонансу, наведений на рисунку 1.6.

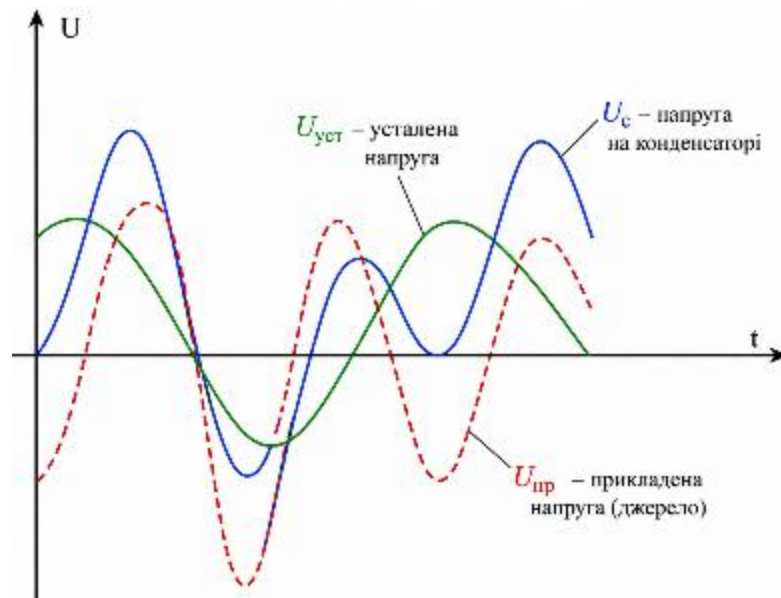


Рисунок 1.6 – Напруга на ємності R–L–C контуру при підключенні до джерела гармонійної напруги за умов резонансу

У подібних електричних колах перенапруги виникають у результаті накладання вільної складової перехідного процесу на вимушену складову, яка має синусоїдальний характер і визначається частотою живильної мережі. Величина комутаційних перенапруг залежить від параметрів електричного кола, моменту виконання комутації та початкових умов перехідного процесу. [8]

При аналізі перенапруг використовуються коефіцієнти, які характеризують вплив різних факторів на максимальне значення напруги. Коефіцієнт  $(V)$  визначається переважно співвідношенням власної частоти коливань контуру  $\omega'$  та частоти джерела живлення  $(\omega)$ , тобто залежить від параметрів схеми заміщення мережі. Водночас коефіцієнт  $\chi$  значною мірою визначається початковими умовами комутації, зокрема кутом вмикання  $\psi_e$  та початковим значенням напруги на лінії  $U_0$

Для більш точного аналізу перехідних процесів при вмиканні довгих ліній електропередачі застосовують математичні моделі з розподіленими параметрами. У цьому випадку лінія розглядається як система, в якій електричні параметри розподілені по всій довжині провідника. Розв'язання відповідної системи диференціальних рівнянь дозволяє визначити зміну напруги та струму в будь-якій точці лінії та оцінити максимальні значення перенапруг. [9]

Еквівалентна схема вмикання довгої лінії електропередачі наведена на рисунку 1.7.

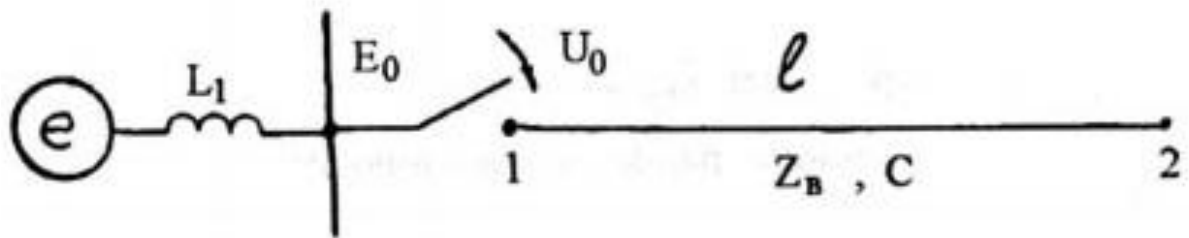


Рисунок 1.7 – Еквівалентна схема вмикання довгої лінії електропередачі

Аналіз результатів досліджень показує, що рівень перенапруг при синхронізованому підключенні ліній порівняно мало залежить від типу вимикача за умови відсутності спеціальних засобів обмеження перенапруг. До таких засобів належать шунтувальні резистори, пристрої керованої комутації та системи вибору оптимального моменту вмикання фаз.

Перенапруги, які виникають під час вмикання конденсаторних батарей, за своєю природою подібні до перенапруг при комутації ліній електропередачі. Основною причиною їх появи є повторне запалювання електричної дуги між контактами вимикача, що супроводжується багаторазовим перезарядом ємностей та виникненням високочастотних коливань.

При вмиканні індуктивних елементів мережі, таких як силові трансформатори, електричні машини та реактори, перенапруги виникають унаслідок коливального процесу заряджання паразитних ємностей обмоток і з'єднувальних кабелів. Наявність обмоток, з'єднаних за схемою трикутника, а також неодноразовість замикавання контактів різних фаз можуть призводити до збільшення рівня перенапруг через появу ненульових початкових умов у колі.

Особливо небезпечні перенапруги можуть виникати під час вимкнення ненавантажених ліній електропередачі. У момент проходження струму через нуль електрична дуга між контактами вимикача гасне, після чого починається

відновлення діелектричної міцності міжконтактного проміжку. Якщо відновлювана напруга перевищує діелектричну міцність ізоляційного проміжку, відбувається повторне запалювання дуги. У результаті ємність лінії знову заряджається через коливальний процес, що супроводжується виникненням імпульсів перенапруги.

При повільному відновленні ізоляції контактів вимикача можливе багаторазове повторне запалювання дуги, внаслідок чого формується серія імпульсів перенапруги, які створюють значні навантаження на ізоляцію електрообладнання.

Для пояснення механізму виникнення таких перенапруг використовується спрощена схема заміщення, у якій мережа представлена джерелом ЕРС з послідовно ввімкненими активним опором та індуктивністю, а лінія електропередачі замінюється зосередженою ємністю. У момент часу  $t_1$ , коли струм проходить через нульове значення, електрична дуга між контактами вимикача гасне, що призводить до припинення надходження енергії в дуговий канал та початку процесу відновлення ізоляції.

Отже, багаторазові повторні запалювання електричної дуги можуть спричиняти виникнення серії імпульсних перенапруг, які становлять серйозну небезпеку для ізоляції електрообладнання. Найбільш несприятливі умови виникають у випадках, коли повторне запалювання відбувається в моменти максимального значення напруги, що призводить до суттєвого збільшення амплітуди перенапруг. У сучасних комутаційних апаратах процес повторного запалювання має випадковий характер, тому накопичення перенапруг від одного циклу до іншого зазвичай не призводить до їх необмеженого зростання. [10]

Сучасні високовольтні вимикачі оснащуються спеціальними конструктивними рішеннями, спрямованими на запобігання повторному запалюванню дуги після розмикання контактів. Зокрема, елегазові та вакуумні вимикачі забезпечують швидке відновлення електричної міцності міжконтактного проміжку, що значно знижує ймовірність виникнення небезпечних перенапруг. У мережах, обладнаних такими вимикачами, перенапруги під час відключення ненавантажених ліній, як правило, не досягають критичних значень. Натомість у масляних вимикачах через

відносно повільне відновлення ізоляційних властивостей між контактами ризик повторного запалювання дуги є значно вищим.

Під час комутації ємнісних струмів у мережі можуть виникати багаторазові повторні запалювання дуги, які супроводжуються серією перехідних процесів та перенапруг. Аналогічні явища спостерігаються і при вимиканні малих індуктивних струмів, коли відбувається примусове припинення струму та виникають високочастотні коливання напруги. Крім того, в мережах з ізольованою нейтраллю при однофазних КЗ на землю можуть виникати багаторазові дугові процеси, які також супроводжуються появою значних перенапруг.

Приклад виникнення дугових перенапруг у мережі представлено на рисунку 1.8.

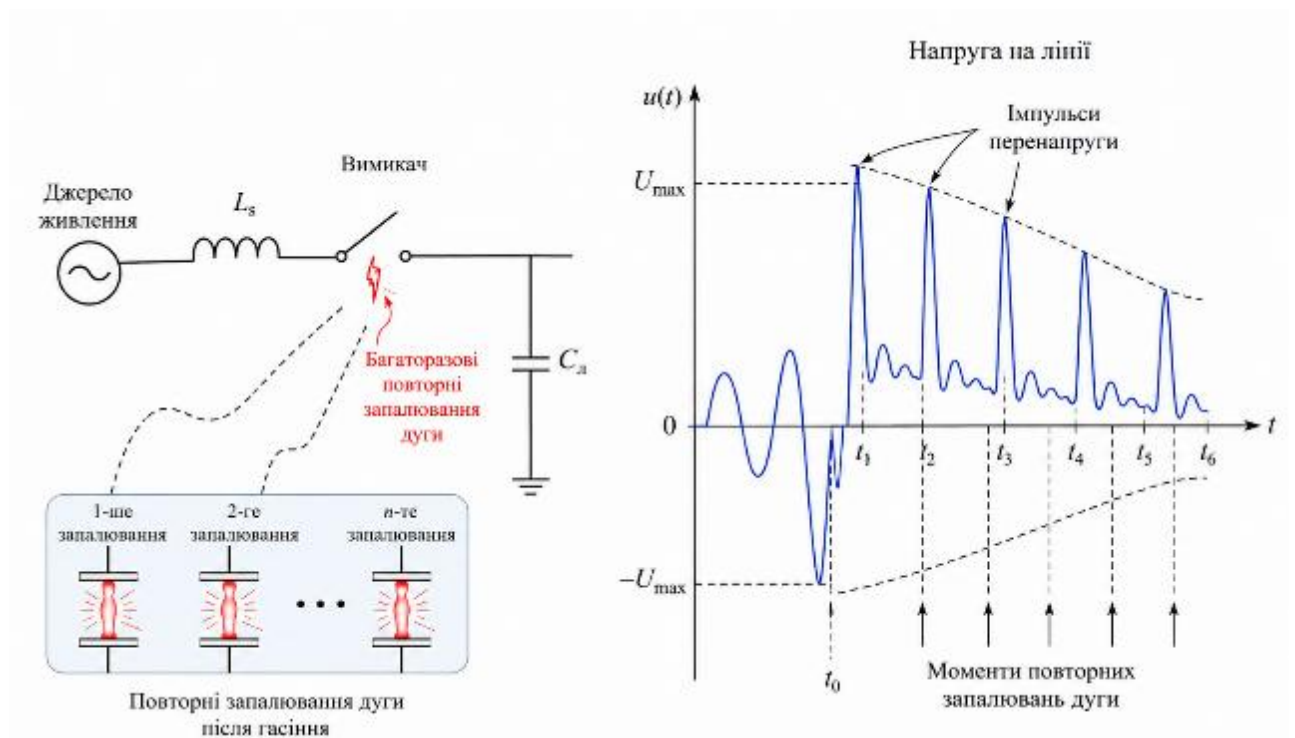


Рисунок 1.8 – Виникнення перенапруг при багаторазових повторних запалюваннях електричної дуги

Однією з основних причин появи квазістаціонарних перенапруг є ємнісний ефект, який проявляється в мережах із значною ємністю щодо землі, а також при роботі довгих ліній електропередачі, підключених до потужних джерел

електроенергії. У таких умовах можливе виникнення тривалих перенапруг, які негативно впливають на стан ізоляції електрообладнання. [11]

До основних причин виникнення комутаційних перенапруг належать:

- вмикання та вимикання пристроїв релейного захисту і автоматики;
- комутація автоматичних вимикачів, контакторів та плавких запобіжників;
- пуск і зупинка потужних асинхронних та синхронних електродвигунів;
- вмикання та вимикання силових трансформаторів;
- комутація батарей статичних конденсаторів та компенсувальних пристроїв;
- відключення ненавантажених повітряних і кабельних ліній електропередачі.

Особливу небезпеку становить відключення ненавантажених ліній за допомогою масляних вимикачів. У разі виникнення перенапруг можливий пробій ізоляції, який може призвести до короткого замикання та пошкодження самого вимикача. Якщо в момент повторного запалювання дуги виникає значний струм короткого замикання, вимикач може втратити здатність до ефективного гасіння дуги. [12]

Для обмеження комутаційних перенапруг застосовуються спеціальні захисні пристрої, серед яких найбільш поширеними є вентиляльні розрядники та нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН). Вони забезпечують відведення надлишкової енергії та запобігають перевищенню допустимого рівня напруги на ізоляції обладнання. Однак у випадку багаторазових повторних запалювань дуги захисні пристрої зазнають підвищених енергетичних навантажень, що необхідно враховувати при їх виборі та експлуатації.

Таким чином, перенапруги під час комутації ненавантажених ліній пов'язані насамперед із процесами вмикання та вимикання ємнісних струмів, а їх величина визначається параметрами мережі, типом комутаційного апарата та характером перехідного процесу.

Слід зазначити, що навіть при відключенні відносно малопотужних електротехнічних пристроїв можуть виникати значні комутаційні перенапруги. Наприклад, під час відключення трансформатора потужністю близько 1 кВА амплітуда імпульсної перенапруги може досягати кількох кіловольт. Це

пояснюється вивільненням електромагнітної енергії, накопиченої в магнітному полі обмоток трансформатора, яка під час комутації повертається в електричну мережу та може негативно впливати на підключене обладнання.

#### **1.4 Висновки до розділу**

Розглянуто основні поняття, класифікацію, причини виникнення та особливості розвитку комутаційних перенапруг в електроенергетичних системах.

Проведений аналіз показав, що величина та характер комутаційних перенапруг залежать від параметрів мережі, співвідношення індуктивних і ємнісних елементів, моменту виконання комутації, а також конструктивних особливостей вимикачів. Визначено, що найбільш небезпечні перенапруги виникають під час комутації ненавантажених ліній електропередачі, конденсаторних батарей, трансформаторів та інших індуктивно-ємнісних навантажень, особливо за наявності повторних запалювань електричної дуги.

Розглянуто механізми виникнення коливальних процесів у R–L–C контурах та вплив резонансних явищ на рівень перенапруг. Також проаналізовано сучасні технічні рішення щодо зменшення рівня комутаційних перенапруг, серед яких найбільш ефективними є вакуумні та елегазові вимикачі, вентильні розрядники та обмежувачі перенапруг.

## 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Засоби фіксації та вимірювання комутаційних перенапруг

Засобами фіксації та вимірювання комутаційних перенапруг є варистори, які є основними елементами обмежувачів перенапруги (ОПН). Варистор – це напівпровідниковий резистор з нелінійною характеристикою. Його опір змінюється залежно від прикладеної напруги. [9]

Простими словами, коли до варистору підведено невелика напруга, значення опору варистора велике і струм, що протікає через нього дуже малий. Але при підвищенні напруги до певного значення, через варистор різко починає протікати струм. Значення струму збільшується пропорційно збільшенню прикладеної напруги, але при цьому вони мають нелінійний зв'язок, що можна побачити на вольтамперній характеристиці варистора, представлений на рисунку 2.1.

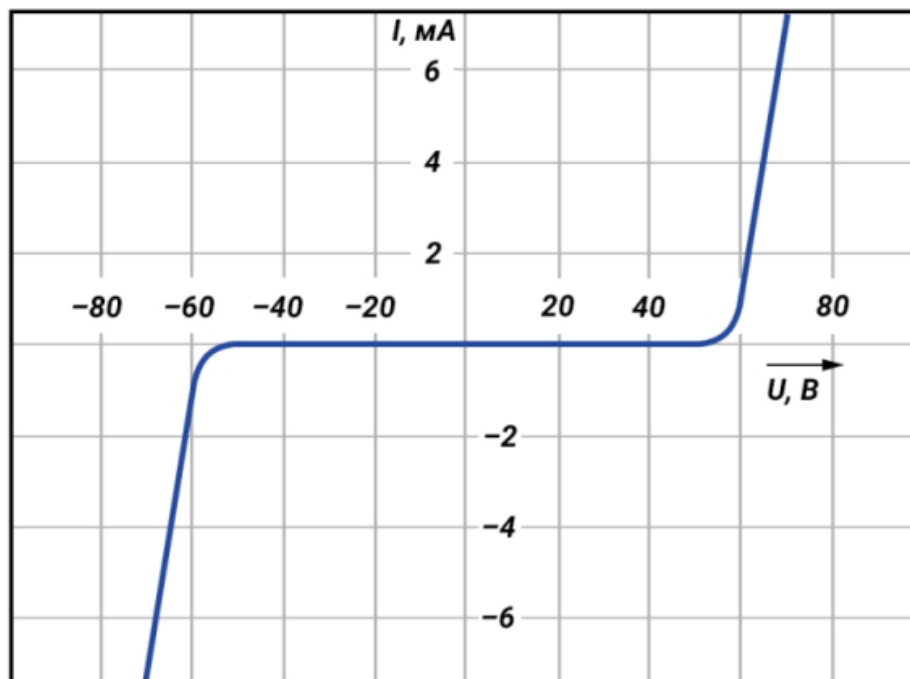


Рисунок 2.1 – Вольтамперна характеристика варистора

Припустимо, що при комутації (включенні та виключенні) ПЛ енергія комутаційних перенапруг, які мають максимальне значення  $U_{МАКС}$ , накопичується в ємності цієї лінії:

$$W = \frac{CU_{МАКС}^2}{2} \quad (2.1)$$

де  $C = C^* \cdot l$  – ємність лінії, що визначається через її довжину  $l$  і погонну  $C^*$ .

Перенапруги зручно характеризувати кратністю – це ступінь перевищення перенапругою максимального фазного значення найбільшого робочої напруги

$K = \frac{U_{МАКС}}{\sqrt{2} \cdot U_{HP} / \sqrt{3}}$ , де  $U_{HP}$  – найбільша робоча напруга мережі. Тоді

$$W = \frac{C^* \cdot l \cdot \left( K \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{HP} \right)^2}{2} \quad (2.2)$$

Для порівняння ОПН різних класів напруг краще оцінювати енергію у відносних одиницях найбільшої робочої напруги ОПН:

$$W_{ПЕ} = \frac{W}{U_{HPo}} \quad (2.3)$$

де  $W_{ПЕ}$  – питома енергія, що розсіюється, яка за своєю суттю і розмірністю відповідає минулому через ОПН заряду. Остаточний вираз:

$$W_{ПЕ} = \frac{C^* \cdot l \cdot K^2 \cdot U_{HP}}{3} \cdot \frac{U_{HP}}{U_{HPo}} \quad (2.4)$$

де від класу напруги практично не залежать: кратність  $K$ , співвідношення  $U_{HP}/U_{HPO}$ , у разі заземленої нейтралі  $U_{HP}/U_{HPO} = \sqrt{3}$ , а у разі ізольованої нейтралі  $U_{HP}/U_{HPO} = 1$ .

З виразу (2.4) видно, що енергія комутаційних перенапруг рівна класу напруги  $U_{HP}$  і довжині лінії  $l$ . Насправді зростання питомої розсіюваної енергії  $W_{PE}$  відбувається швидше  $U_{HP}$ , так як ємність  $C^*$  слабо залежить від класу, тому як число складових у фазному проводі та їх радіус зростають із зростанням напруги.

Згідно з (2.4), прийнявши деяку довжину лінії  $l$ , можна, наприклад, продемонструвати, що у системі 750 кВ, де  $U_{HP} = 787$  кВ, комутаційні перенапруги мають питому енергію, що перевищує питому енергію для мережі 6 кВ, з  $U_{HP} = 7,2$  кВ, більш ніж в 100 разів.

Перенапруги при відключенні індуктивних елементів мережі виявляються за швидким примусовим зниженням («відключенням») струму дуги в автоматичному вимикачі. Енергія магнітного поля індуктивності перетворюється в енергію електричного поля конденсатора від'єднаної обмотки. Результуючі перенапруги залежать від миттєвого значення струму вимикача і швидкості зміни під час відключення, параметрів кола і характеристик збудження індуктивного елемента.

## 2.2 Способи боротьби з комутаційними перенапругами

Надійна робота електроустановок гарантується тільки в тому випадку, якщо міцність ізоляції перевищує максимально можливі рівні напруги ізоляції в умовах тривалої експлуатації і перенапруги.

Для зменшення ризику виникнення підвищених напруг під час комутації ліній електропередачі застосовують низку технічних заходів, спрямованих на обмеження перенапруг та покращення умов роботи електричної мережі. Ці заходи дозволяють знизити вплив перехідних процесів на обладнання та підвищити надійність функціонування електроенергетичної системи.

1. Заходи обмеження вимушеної складової комутаційних перенапруг. До них відносяться: поділ далеких ліній електропередачі на ділянки довжиною не більше 300 км з підключеними до проміжних точок пристроями підтримки нормального рівня напруги; вибір такої послідовності включення кінців лінії, при якій спочатку лінія підключається до шин найбільш потужної підстанції, а потім - до шин менш потужної підстанції

2. Заходи, спрямовані на ослаблення перехідної складової комутаційного процесу при включенні ліній. Сюди відносяться установка шунтуючих опорів у вимикачах і "синхронне включення" вимикачів. Послаблення інтенсивності перехідного процесу при включенні лінії можна досягти також шляхом введення на час комутації активних опорів в ланцюг струму, що протікає по шунтуючим реакторам, наприклад, включення резистора в нейтраль обмоток групи трифазних реакторів.

Ризик розриву ненавантаженої лінії з масляним вимикачем невеликого обсягу також підкреслюється тим фактом, що перекриття ізоляції, викликане цими перенапругами, може привести до руйнування автоматичного вимикача: якщо коротке замикання відбувається під час обриву лінії і струм різко зростає, такий вимикач може і не погасити дуги. Радикальним заходом боротьби з цим типом комутаційної перенапруги є використання вимикачів без небезпечного повторного запалювання дуги при відключеній лінії.

В іншому випадку рекомендується обладнати лінію засобами для зняття залишкового заряду: розмістіть вимірювання на лінії з трансформатором електромагнітної напруги або відрегулюйте інші способи зняття залишкового заряду з лінії. Підключення до лінії змішувального реактора виявилось ефективним. Наближення до кривої у вигляді кривої напруги, яка залишається на лінії ЕРС, уповільнює зростання напруги між контактами перемикача і, таким чином, знижує ймовірність повторного запалювання дуги.

Крім того, можна знизити коефіцієнт перенапруги при автоматичному повторному включенні ліній до характеристики планованого підключення, знявши залишковий заряд з лінії під час збою живлення АПВ. Це підключення можна

виконати до трансформатора напруги електромагнітного типу або спеціальної лінії реактора з високим активним опором обмоток.

Видалення електромагнітного ТН з лінії в мережах 500 кВ дозволило виключити перенапругу при автоматичному замиканні лінії 500 кВ як самостійний вид перенапруги, практично зрівнявши характеристики розподілу при цих комутаціях при зміщеній за часом комутації ліній. У деяких випадках перехід від трифазного до автоматичного перепідключення (АП) також сприяє зниженню перенапруг при усуненні аварійних ситуацій на лінії.

### **2.3 Засоби боротьби з комутаційними перенапругами**

Комутаційні перенапруги є одним із найбільш небезпечних видів внутрішніх перенапруг, які виникають у процесі експлуатації електроенергетичних систем. Їх поява може призводити до пошкодження ізоляції, прискореного старіння електрообладнання, аварійних відключень та порушення нормальної роботи електричних мереж. Для забезпечення надійної електроенергетичних систем застосовуються різноманітні технічні засоби, спрямовані на обмеження амплітуди та тривалості комутаційних перенапруг.

Основними методами боротьби з комутаційними перенапругами є використання сучасних комутаційних апаратів, нелінійних обмежувачів перенапруг, шунтувальних резисторів, RC-ланцюгів, реакторів, а також систем керованої комутації. Вибір конкретного способу захисту залежить від класу напруги мережі, режиму роботи обладнання та економічної доцільності його застосування.

Одним із ефективних способів є використання сучасних вимикачів, які забезпечують швидке та надійне гасіння електричної дуги. Особливе поширення в електроенергетичних системах отримали вакуумні та елегазові вимикачі.

У вакуумних вимикачах дуга гаситься у вакуумі, що забезпечує швидке відновлення діелектричної міцності між контактами та зменшує ймовірність повторного запалювання дуги. В елегазових вимикачах для гасіння

використовується газ SF<sub>6</sub>, який має високі ізоляційні властивості та ефективно охолоджує дуговий канал.

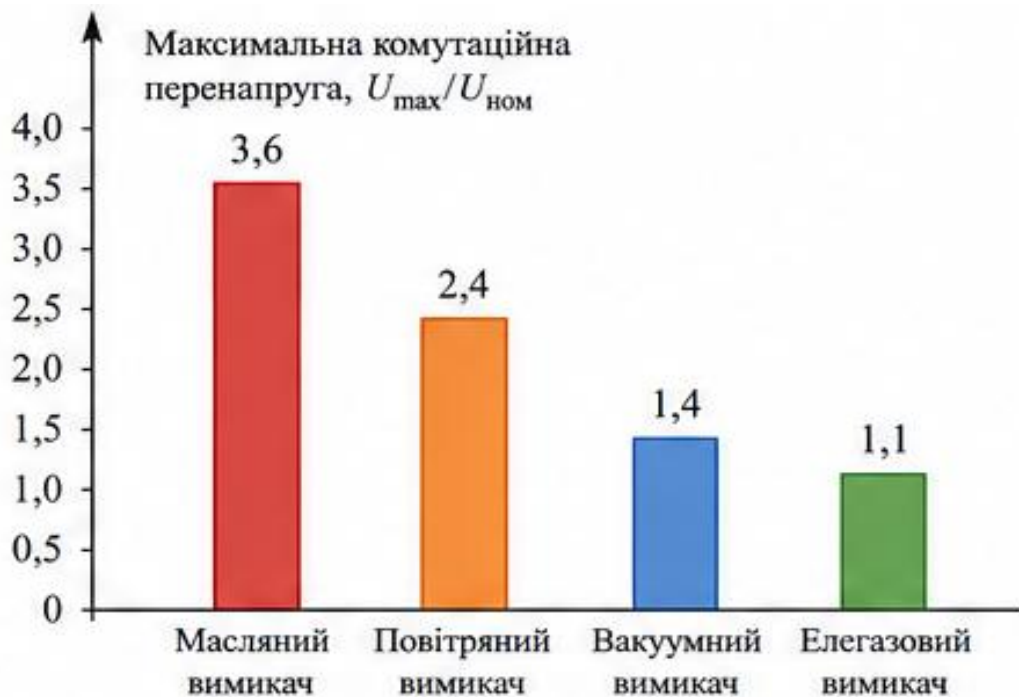


Рисунок 2.2 – Вплив типу вимикача на рівень комутаційних перенапруг

Застосування сучасних вимикачів дозволяє суттєво зменшити ймовірність виникнення небезпечних перенапруг та підвищити надійність роботи електричних мереж.

Найбільш поширеним засобом є нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН). Основним елементом таких пристроїв є металоксидні варистори, опір яких залежить від прикладеної напруги.

У нормальному режимі роботи опір варистора дуже великий, тому струм через нього практично відсутній. При виникненні перенапруги опір різко зменшується, а надлишкова енергія відводиться в землю.

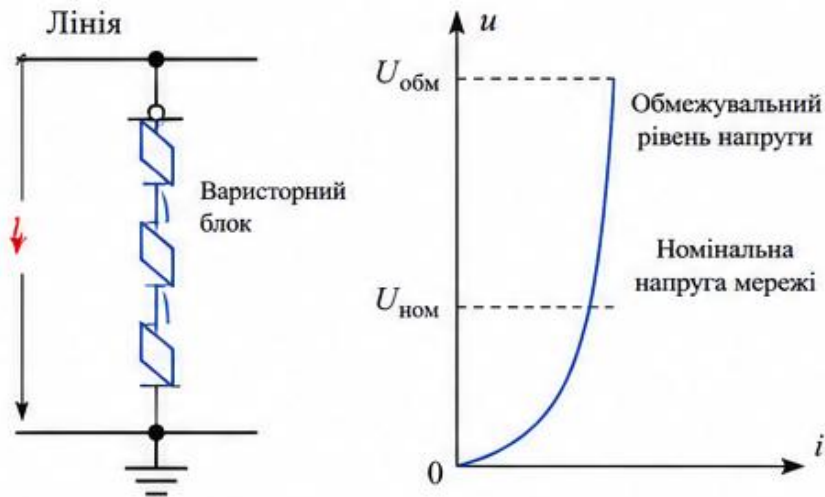


Рисунок 2.3 – Принцип роботи нелінійного обмежувача перенапруг

Завдяки високій швидкодії та надійності сучасні ОПН широко використовуються на підстанціях, лініях електропередачі та промислових підприємствах.

Для захисту електротехнічного обладнання від імпульсних перенапруг використовуються демпфувальні RC-ланцюги, які складаються з резистора та конденсатора, з'єднаних послідовно.

RC-ланцюг забезпечує зменшення швидкості зміни напруги під час комутаційного процесу та поглинає частину енергії коливань.

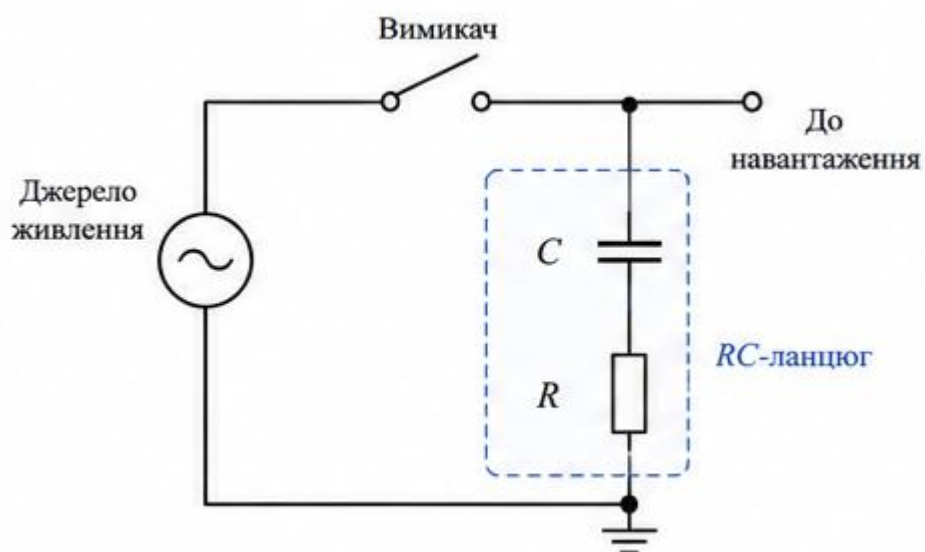


Рисунок 2.4 – Схема підключення RC-кола для обмеження комутаційних перенапруг

Особливо ефективним є використання RC-ланцюгів для захисту обмоток трансформаторів, контакторів, електромагнітних реле та напівпровідникових пристроїв.

У мережах високої та надвисокої напруги широко застосовуються шунтувальні резистори, які встановлюються паралельно контактам вимикачів. Під час комутації вони забезпечують частковий відвід енергії перехідного процесу та зменшують амплітуду перенапруг.

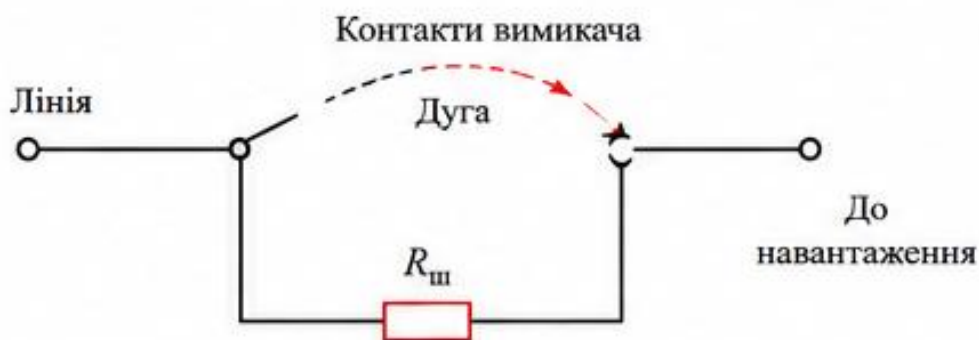


Рисунок 2.5 – Застосування шунтувального резистора для обмеження комутаційних перенапруг

Шунтувальні резистори особливо ефективні при комутації довгих повітряних ліній та конденсаторних батарей.

Сучасним методом боротьби з комутаційними перенапругами є керована комутація. Принцип її роботи полягає у виборі оптимального моменту замикання або розмикання контактів вимикача відповідно до фази напруги або струму мережі.

За допомогою спеціальних мікропроцесорних пристроїв визначається момент, коли напруга або струм проходять через нульове значення, після чого формується команда на комутацію.



Рисунок 2.6 – Принцип реалізації керованої комутації

Застосування такого підходу дозволяє значно знизити амплітуду перехідних процесів та рівень комутаційних перенапруг.

Для обмеження швидкості зміни струму та зниження рівня перенапруг використовуються струмообмежувальні реактори. Реактор являє собою індуктивний елемент, який вмикається послідовно в коло та перешкоджає різким змінам струму.

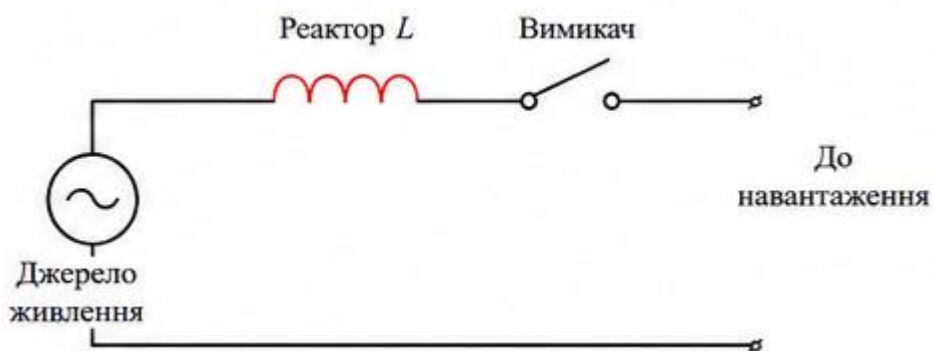


Рисунок 2.7 – Схема застосування реактора для обмеження комутаційних перенапруг

Використання реакторів є ефективним під час комутації конденсаторних батарей, потужних електродвигунів та довгих кабельних ліній.

У сучасних електроенергетичних системах найкращий результат забезпечується комплексним використанням декількох засобів захисту. Як правило, застосовується поєднання сучасних вимикачів, обмежувачів перенапруг, реакторів та пристроїв керованої комутації.

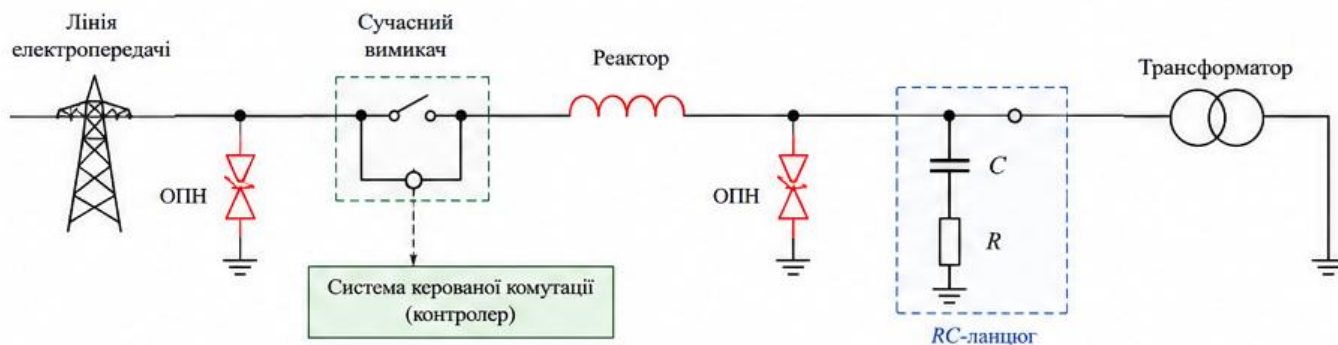


Рисунок 2.8 – Комплексна система захисту електроенергетичної мережі від комутаційних перенапруг

Такий підхід дозволяє мінімізувати рівень перенапруг незалежно від режиму роботи мережі та значно підвищити надійність електропостачання.

## 2.4 Оцінка ефективності існуючих способів і засобів обмеження комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги є одним із найнебезпечніших видів внутрішніх перенапруг, що виникають у процесі експлуатації електроенергетичних систем. Їх поява супроводжує процеси вмикання та вимикання ліній електропередачі, трансформаторів, електродвигунів, конденсаторних батарей та іншого електротехнічного обладнання. Внаслідок комутаційних процесів можуть виникати значні імпульсні та квазістаціонарні перенапруги, які негативно впливають на стан ізоляції та знижують надійність роботи електроенергетичного обладнання.

Для запобігання пошкодженню обладнання та забезпечення нормативного рівня електромагнітної сумісності застосовуються різноманітні способи та технічні засоби обмеження перенапруг. Ефективність кожного із них визначається величиною зниження перенапруг, вартістю впровадження, надійністю роботи та сферою застосування.

Найбільш поширеним засобом захисту від комутаційних перенапруг є нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН). Вони побудовані на основі металоксидних

варисторів, які мають різко нелінійну вольт-амперну характеристику. За нормальних умов роботи мережі опір варистора є дуже великим, тому струм через нього практично не протікає. У випадку виникнення перенапруги опір варистора різко зменшується, що забезпечує відведення надлишкової енергії в землю та обмеження напруги до допустимого рівня.

Основними перевагами ОПН є висока швидкодія, відсутність рухомих елементів, можливість багаторазового спрацьовування та висока надійність. Завдяки цим властивостям ОПН широко застосовуються на електричних підстанціях, розподільчих пристроях та повітряних лініях електропередач.

Результати експлуатаційних досліджень показують, що застосування обмежувачів перенапруг дозволяє зменшити амплітуду комутаційних перенапруг на 60–80 %, представлено на рисунку 2.9.

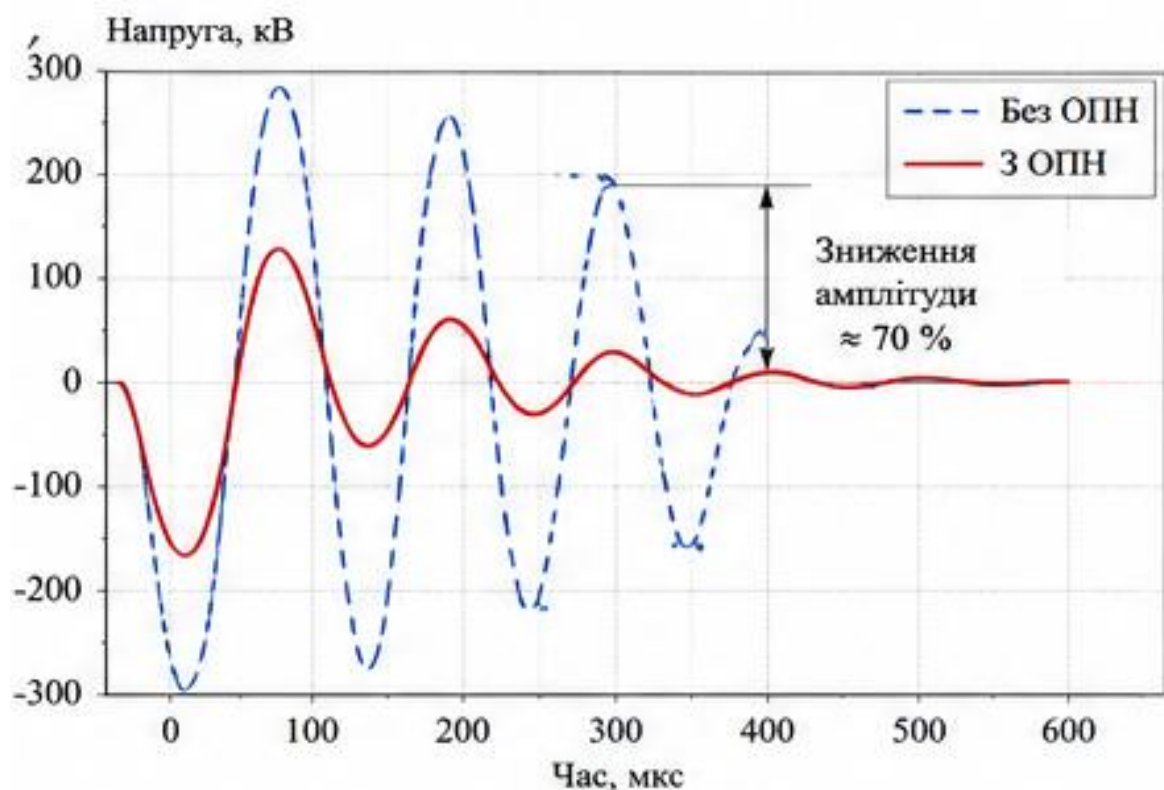


Рисунок 2.9 – Зниження рівня комутаційних перенапруг при застосуванні ОПН

Недоліками ОПН є необхідність правильного вибору робочої напруги та поступове старіння варисторних елементів під впливом багаторазових імпульсних навантажень.

Важливу роль у зменшенні комутаційних перенапруг відіграє тип комутаційного апарата. Найбільш небезпечними з виникнення перенапруг є масляні вимикачі, у яких існує висока ймовірність повторного запалювання електричної дуги. Це призводить до багаторазових перехідних процесів та додаткових перенапруг.

Значно кращі показники мають вакуумні та елегазові вимикачі. У вакуумних вимикачах дуга гаситься у вакуумному середовищі, а в елегазових використовується газ SF<sub>6</sub>, що має високі діелектричні властивості та забезпечує ефективне гасіння дуги.

Використання сучасних вимикачів дозволяє знизити рівень комутаційних перенапруг на 30–60 % порівняно з традиційними масляними вимикачами. Порівняльна оцінка рівнів перенапруг для різних типів вимикачів наведена на рисунку 2.10.

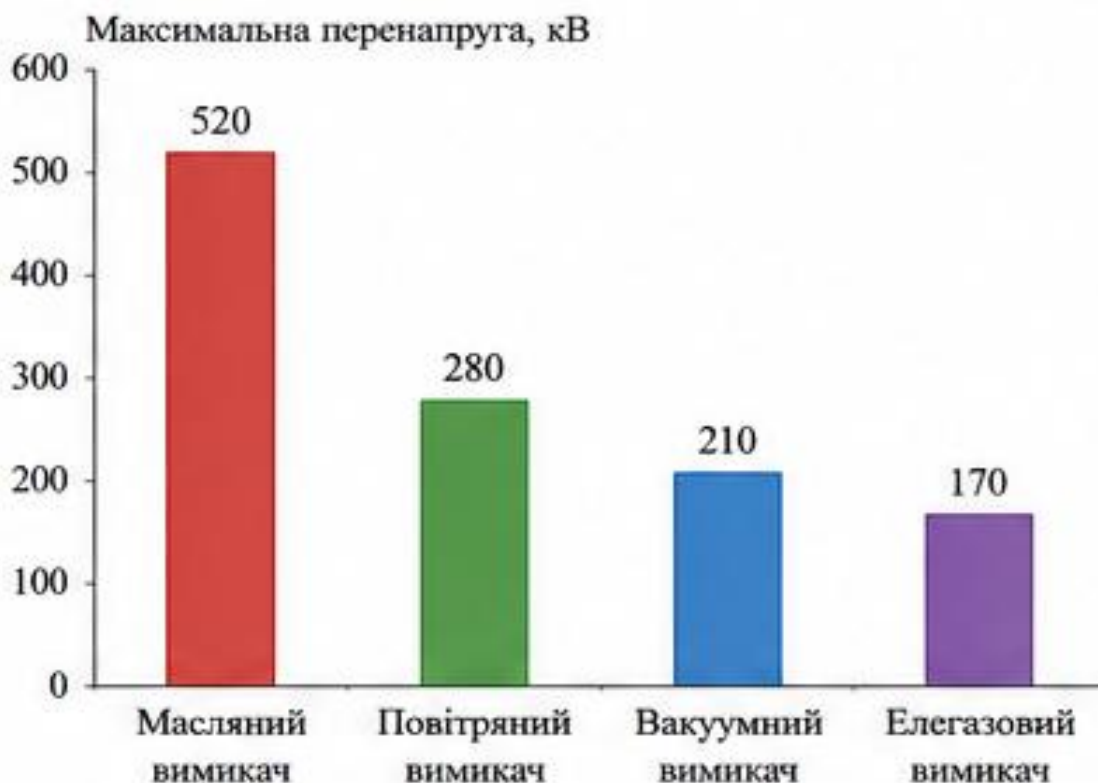


Рисунок 2.10 – Порівняння рівнів перенапруг для різних типів вимикачів

Крім того, вакуумні та елегазові вимикачі мають тривалий ресурс роботи, високу механічну надійність та не потребують складного технічного обслуговування.

Одним із найпростіших способів боротьби з комутаційними перенапругами є використання RC-кіл, які складаються з послідовно з'єднаних резистора та конденсатора. Основною функцією такого кола є демпфування коливальних процесів та зменшення швидкості зміни напруги під час комутації.

Конденсатор накопичує частину енергії перенапруги, а резистор забезпечує її поступове розсіювання у вигляді тепла. Це дозволяє знизити амплітуду коливань і покращити електромагнітну сумісність обладнання.

RC-кола широко використовуються для захисту силових трансформаторів, контакторів, релейних пристроїв та електронних систем керування. Характер зниження перенапруг при використанні RC-ланцюгів показаний на рисунку 2.11.

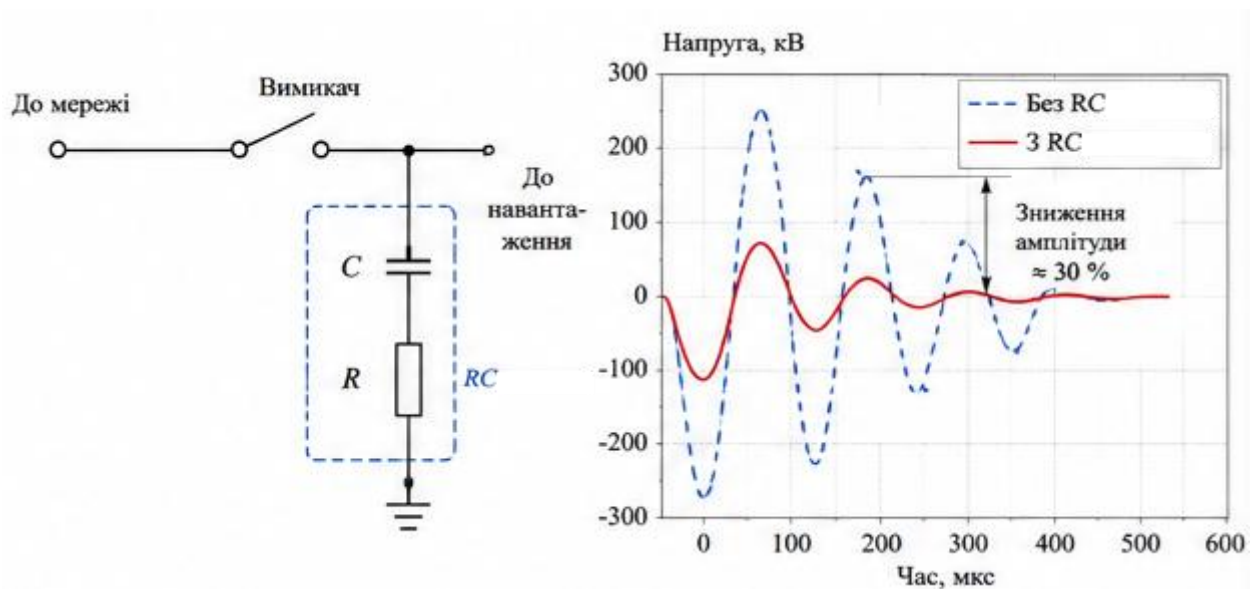


Рисунок 2.11 – Ефективність використання RC-кіл для обмеження перенапруг

Практичні дослідження показують, що застосування RC-ланцюгів забезпечує зниження перенапруг приблизно на 20–40 %. Ефективність такого способу суттєво залежить від вибору параметрів резистора та конденсатора.

У мережах високої та надвисокої напруги широко застосовуються шунтувальні резистори. Вони встановлюються паралельно контактам вимикача та забезпечують частковий відвід енергії під час комутації.

Завдяки використанню шунтувальних резисторів відбувається більш плавний перехід між режимами роботи мережі, що дозволяє зменшити амплітуду перенапруг і знизити інтенсивність коливальних процесів. Вплив шунтувальних резисторів на величину комутаційних перенапруг наведений на рисунку 2.12.

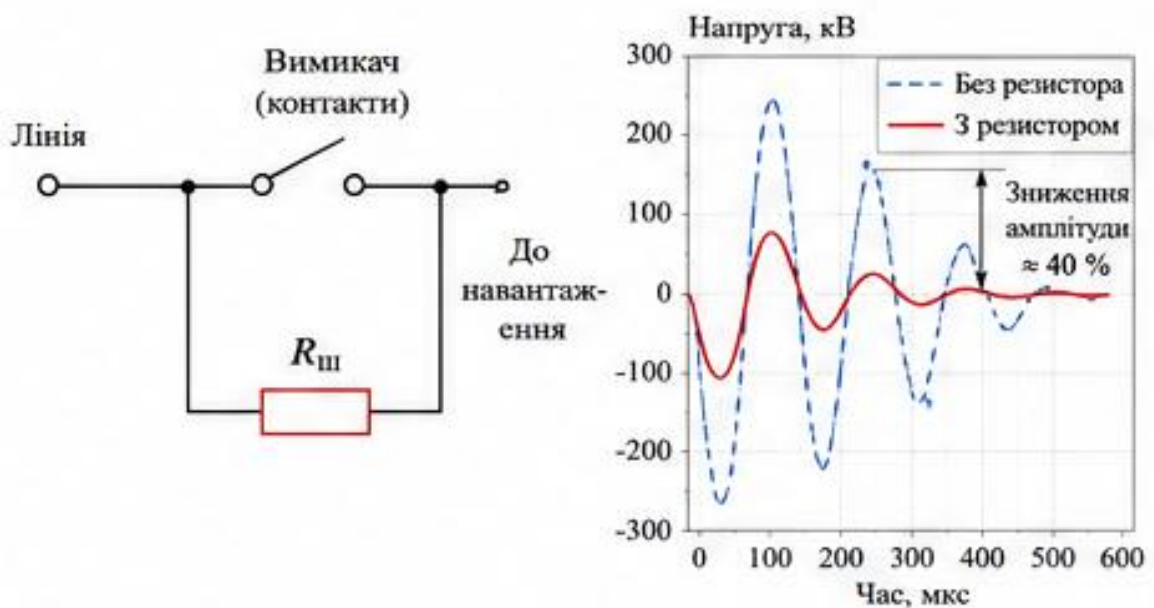


Рисунок 2.12 – Вплив шунтувальних резисторів на величину комутаційних перенапруг

Основними перевагами такого рішення є простота реалізації та висока надійність. До недоліків можна віднести додаткові втрати потужності та необхідність використання резисторів великої потужності.

Ефективність шунтувальних резисторів оцінюється на рівні 30–50 % зниження амплітуди перенапруг.

Керована комутація належить до найбільш сучасних способів боротьби з комутаційними перенапругами. Її принцип полягає у виборі оптимального моменту замикання або розмикання контактів вимикача відносно миттєвого значення напруги або струму.

Для реалізації такого способу використовуються мікропроцесорні пристрої, які контролюють параметри мережі та формують команду на комутацію в найбільш сприятливий момент часу.

Завдяки зменшенню енергії перехідного процесу вдається значно знизити рівень перенапруг, а також зменшити механічні навантаження на обладнання. Результати застосування керованої комутації наведені на рисунку 2.13.

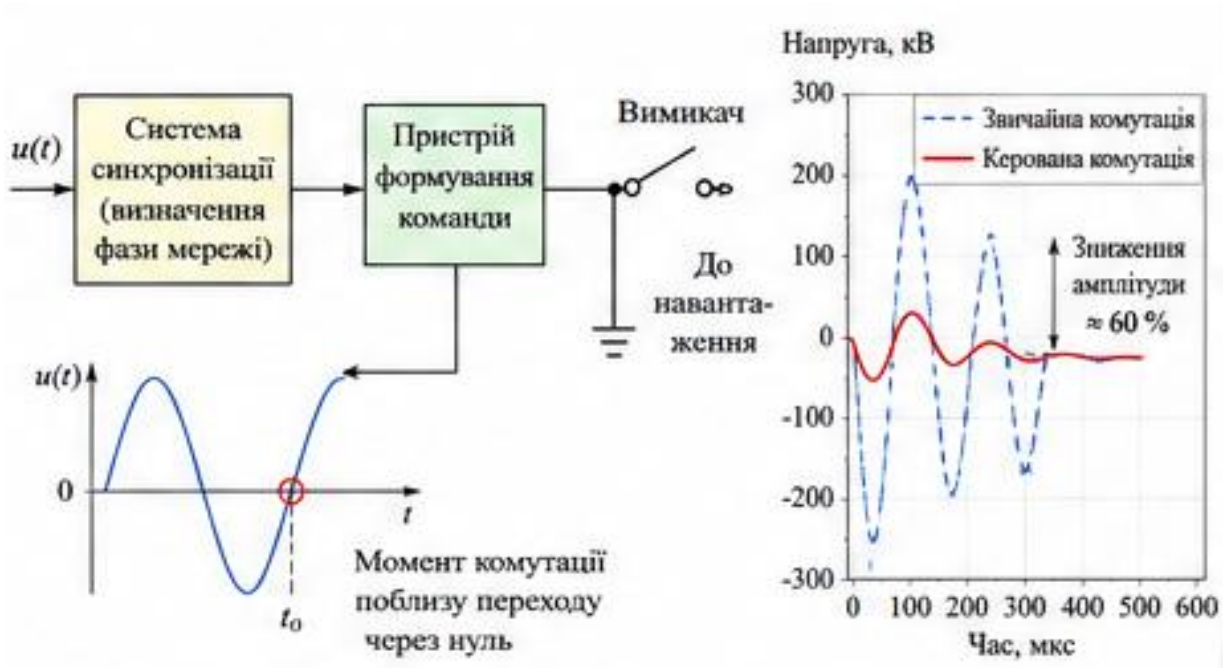


Рисунок 2.13 – Зниження перенапруг при використанні керованої комутації

Застосування керованої комутації дозволяє зменшити рівень комутаційних перенапруг на 50–70 %. Основним недоліком такого способу є висока вартість обладнання та складність його налаштування.

Струмообмежувальні реактори використовуються для обмеження швидкості зміни струму та зниження енергії перехідних процесів. Реактор являє собою індуктивний елемент, який вмикається послідовно в електричне коло.

Реактори особливо ефективні при комутації конденсаторних батарей, кабельних ліній та потужних електродвигунів. Вплив реакторів на рівень комутаційних перенапруг наведений на рисунку 2.14.

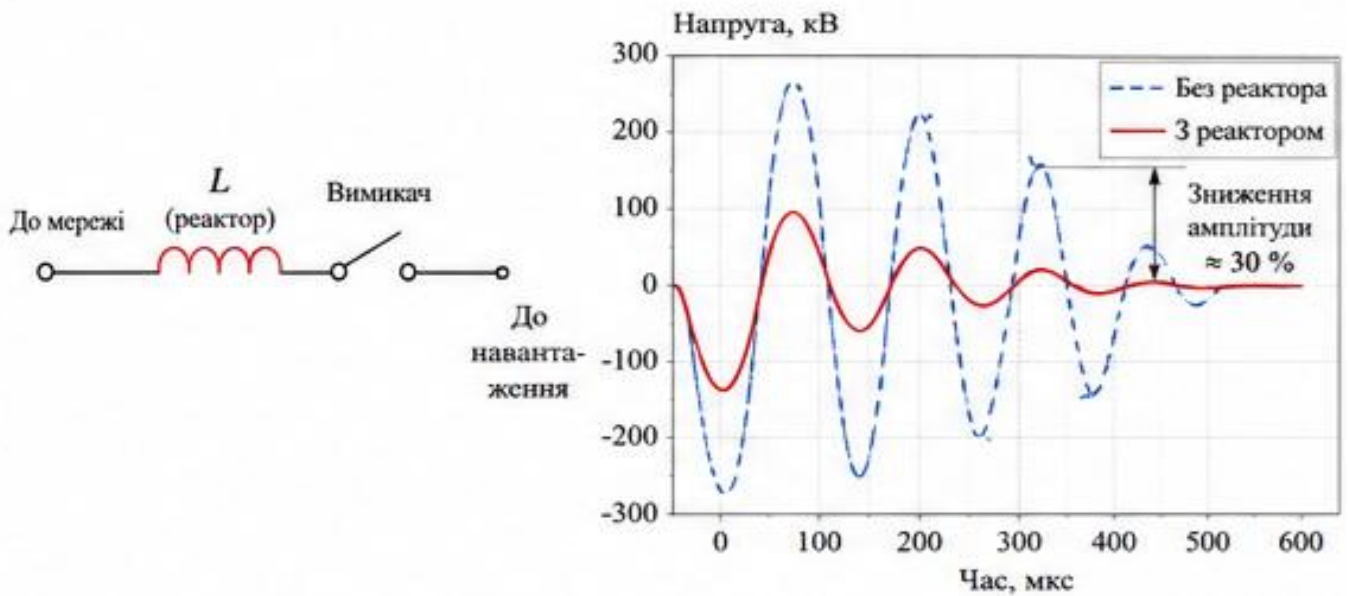


Рисунок 2.14 – Вплив реакторів на рівень комутаційних перенапруг

Реактори особливо ефективні при комутації конденсаторних батарей, кабельних ліній та потужних електродвигунів. Зниження рівня перенапруг при їх використанні становить приблизно 20–40 %.

Для об'єктивної оцінки різних засобів обмеження перенапруг було виконано їх порівняння за критеріями ефективності, вартості та надійності. Результати порівняльного аналізу наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння ефективності засобів обмеження комутаційних перенапруг

Засіб захисту	Зниження перенапруг, %	Вартість	Надійність
ОПН	60–80	Середня	Висока
Вакуумні вимикачі	30–60	Висока	Висока
Елегазові вимикачі	30–60	Висока	Висока
РС-ланцюги	20–40	Низька	Висока
Шунтувальні резистори	30–50	Середня	Висока
Керована комутація	50–70	Висока	Висока
Реактори	20–40	Середня	Висока

З аналізу даних таблиці 2.1 видно, що найбільшу ефективність щодо зниження рівня комутаційних перенапруг забезпечують нелінійні обмежувачі перенапруг та системи керованої комутації. Водночас застосування сучасних вакуумних і елегазових вимикачів також дозволяє суттєво зменшити амплітуду перехідних процесів.

Порівняльна оцінка ефективності розглянутих засобів захисту представлена на рисунку 2.15, з якого видно, що найбільш результативним є комплексне застосування декількох способів обмеження перенапруг.

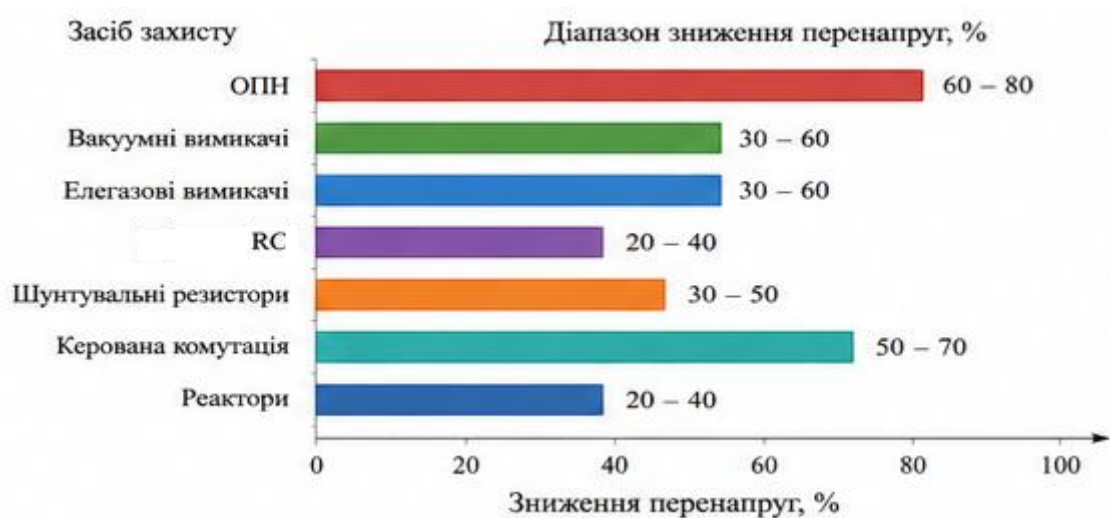


Рисунок 2.15 – Порівняльна ефективність існуючих засобів обмеження комутаційних перенапруг

## 2.5 Висновки до розділу

У другому розділі розглянуто основні засоби фіксації, вимірювання та обмеження комутаційних перенапруг в електроенергетичних системах. Проаналізовано принцип роботи варисторів і нелінійних обмежувачів перенапруг, а також встановлено залежність енергії перенапруг від параметрів електричної мережі та довжини ліній електропередач.

Досліджено основні способи боротьби з комутаційними перенапругами, серед яких використання вакуумних та елегазових вимикачів, ОПН, РС-ланцюгів, шунтувальних резисторів, реакторів і систем керованої комутації. Встановлено, що

найбільшу ефективність забезпечують нелінійні обмежувачі перенапруг та керована комутація, які дозволяють суттєво знизити рівень перенапруг і підвищити надійність роботи обладнання.

Проведений аналіз показав, що найкращі результати досягаються при комплексному застосуванні декількох засобів захисту, що забезпечує ефективне обмеження комутаційних перенапруг та підвищення надійності електроенергетичних систем.

### 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Вплив різних факторів на величини комутаційних перенапруг

Величина комутаційних перенапруг визначається низкою факторів, серед яких основними є параметри ліній електропередачі та величина навантаження електричної мережі. Зміна цих параметрів впливає на характер перебігу перехідних процесів під час комутації та може призводити до збільшення максимальних значень перенапруг.

На рисунку 3.1 наведено модель електричної мережі, розроблену в середовищі MATLAB Simulink для дослідження впливу довжини лінії електропередачі на величину комутаційних перенапруг. Використання імітаційної моделі дозволяє проаналізувати процеси, що виникають під час комутації, та оцінити зміну рівня перенапруг за різних значень протяжності ЛЕП.

Модель досліджуваної електричної мережі включає такі основні елементи:

- трифазне джерело живлення (Three-Phase Source);
- трифазну лінію електропередачі типу PI (Three-Phase PI Section Line);
- трифазний комутаційний апарат (Three-Phase Breaker).

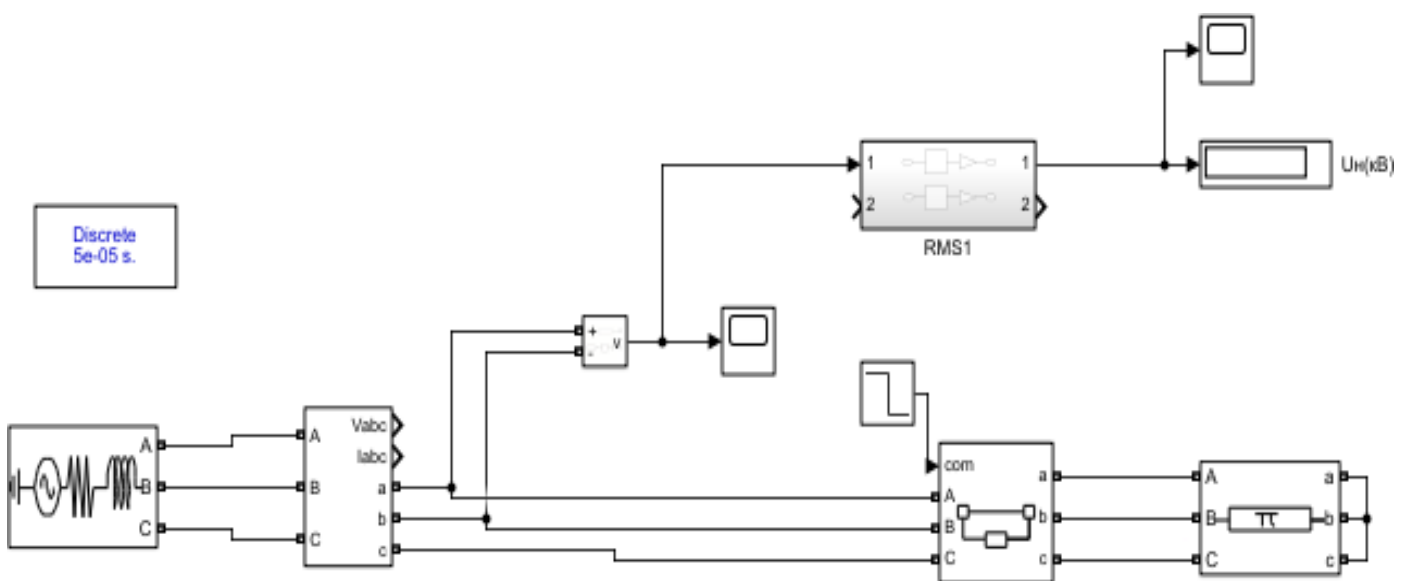


Рисунок 3.1 – Робоча модель лінії на холостому ходу

Результати моделювання перехідного процесу, що виникає під час комутації повітряної лінії електропередачі довжиною 10 км при номінальній напрузі 10 кВ, наведено на рисунку 3.2. На осцилограмі відображено зміну напруги в момент вмикання лінії та виникнення комутаційної перенапруги, спричиненої перерозподілом електромагнітної енергії між індуктивними та ємнісними елементами мережі.

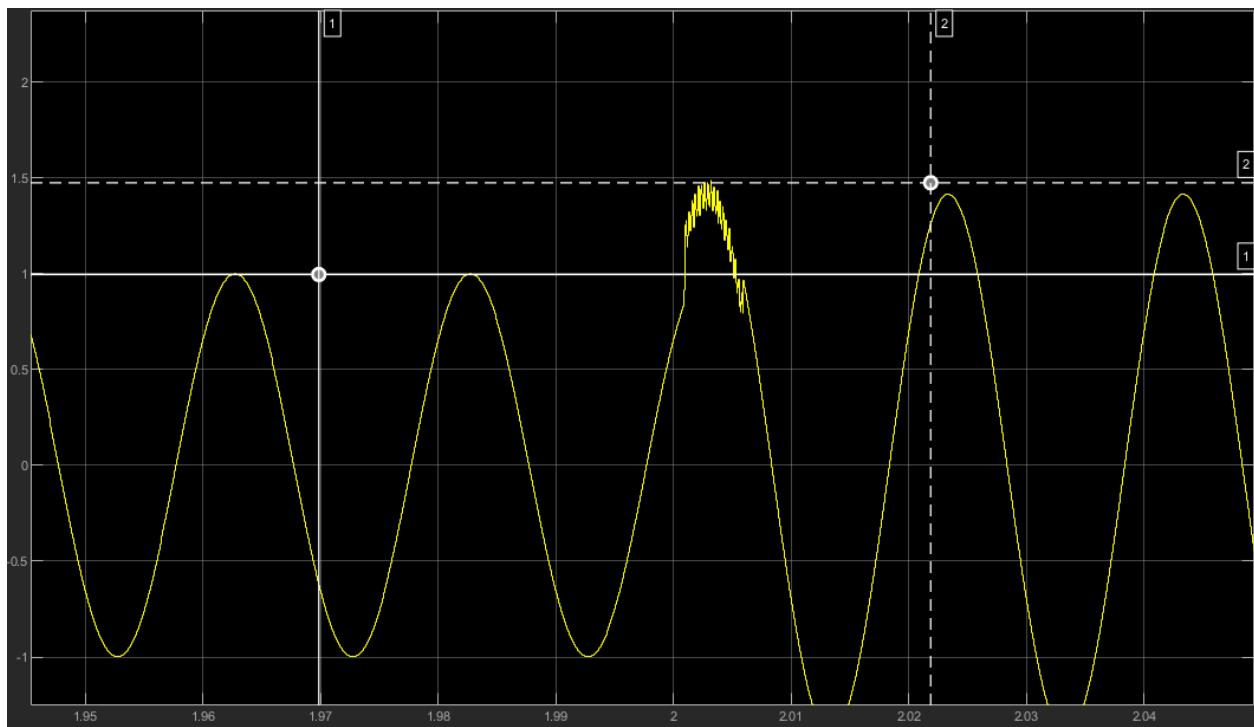


Рисунок 3.2 – Осцилограма комутаційної перенапруги під час вмикання лінії електропередачі довжиною 10 км, що працює в режимі холостого ходу при напрузі 10 кВ.

Аналіз отриманих результатів показує, що після виконання комутації в мережі виникають коливальні процеси, які супроводжуються короткочасним підвищенням напруги відносно її номінального значення. Причиною виникнення таких перенапруг є наявність розподілених параметрів лінії електропередачі, зокрема індуктивності та ємності, які формують коливальний контур і сприяють появі перехідних електромагнітних процесів.

Для більш повного дослідження впливу довжини лінії на величину комутаційних перенапруг було проведено серію аналогічних експериментів для ЛЕП різної протяжності. Під час моделювання незмінними залишалися параметри джерела живлення та режим роботи мережі, а змінювалася лише довжина лінії електропередачі. Це дало можливість визначити залежність максимального значення перенапруги від протяжності ЛЕП та оцінити характер зміни перехідних процесів.

Отримані результати досліджень узагальнено в таблиці 3.1. У таблиці наведено значення напруги до комутації  $U_1$  та максимального значення напруги після комутації  $U_2$ . Порівняння цих величин дозволяє оцінити кратність перенапруги та встановити ступінь впливу довжини лінії на рівень комутаційних процесів.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження комутаційних перенапруг у лінії електропередачі напругою 10 кВ при роботі в режимі холостого ходу

Довжина лінії, км	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$\Delta U$ , кВ
1	10,147	10,736	0,589
4	10,147	10,931	0,790
7	10,145	12,697	2,552
10	10,139	13,153	3,014

Аналіз даних таблиці дає можливість зробити висновок про те, що зі збільшенням довжини лінії електропередачі зростає запас електромагнітної енергії, накопиченої в її реактивних елементах, що, своєю чергою, сприяє збільшенню амплітуди комутаційних перенапруг. Це підтверджує необхідність врахування параметрів ЛЕП під час проєктування електричних мереж та вибору засобів захисту від перенапруг.

За результатами, наведеними в таблиці 3.1, побудовано графік залежності максимального значення комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі. Отримана залежність представлена на рисунку 3.3 і дає можливість

наочно оцінити вплив протяжності ЛЕП на рівень перенапруг, що виникають під час комутаційних операцій.

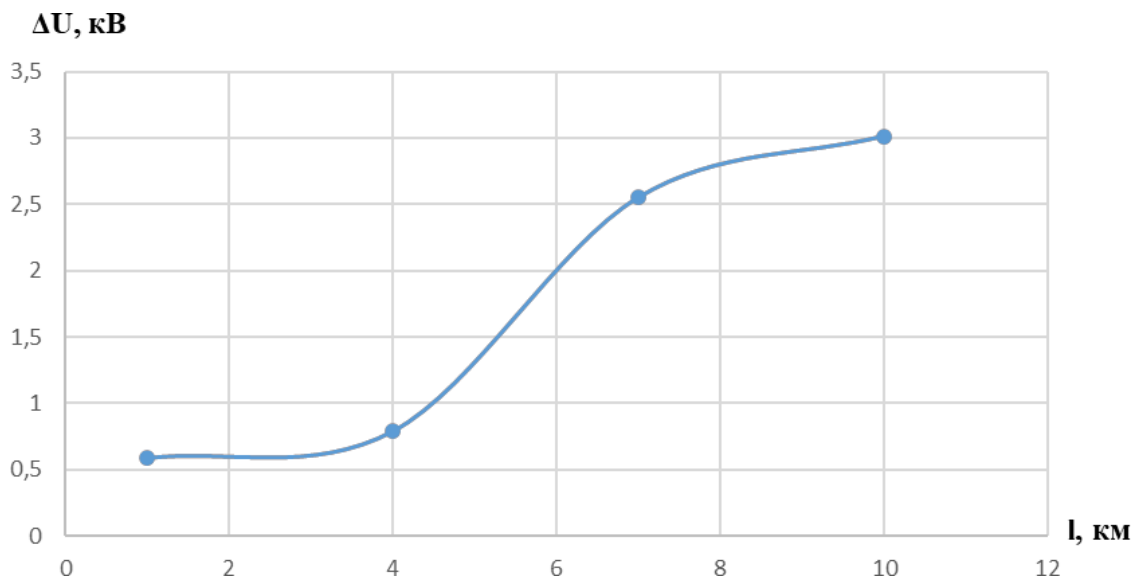


Рисунок 3.3 – Залежність комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі 10 кВ

Аналіз побудованого графіка показує, що зі збільшенням довжини лінії спостерігається зростання величини комутаційних перенапруг. Така закономірність пояснюється збільшенням розподілених параметрів лінії, насамперед її індуктивності та ємності. У довших лініях накопичується більша кількість електромагнітної енергії, яка під час комутації викликає більш інтенсивні перехідні процеси та, відповідно, вищі значення перенапруг.

Отримані результати свідчать про те, що довжина лінії є одним із факторів, які впливають на рівень комутаційних перенапруг. При проєктуванні та експлуатації електричних мереж необхідно враховувати цей фактор під час вибору ізоляції обладнання та засобів захисту від перенапруг. Особливо актуальним це є для протяжних ліній електропередачі, де ймовірність виникнення небезпечних перенапруг значно зростає.

### 3.2 Дослідження впливу величини робочої напруги в вузлах електричної мережі на величину комутаційних перенапруг

Для оцінювання впливу робочої напруги електричної мережі на величину комутаційних перенапруг було використано імітаційну модель, наведену раніше на рисунку 3.1. Дослідження проводилося шляхом зміни рівня робочої напруги за незмінних параметрів мережі та режиму роботи лінії електропередачі.

У процесі моделювання було розглянуто лінію електропередачі довжиною 10 км, що працює в режимі холостого ходу, при робочій напрузі мережі 11 кВ. Осцилограма перехідного процесу та відповідної комутаційної перенапруги наведена на рисунку 3.4.

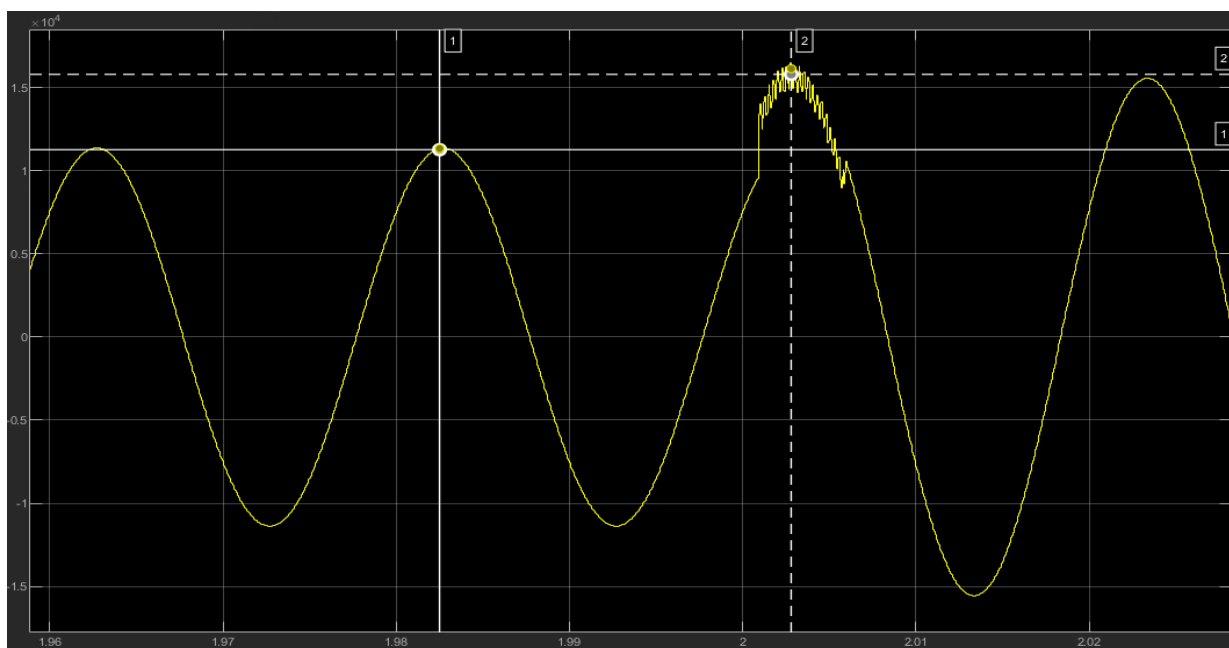


Рисунок 3.4 – Осцилограма комутаційної перенапруги під час вмикання лінії електропередачі довжиною 10 км у режимі холостого ходу при робочій напрузі 11 кВ.

Аналіз отриманих результатів показує, що збільшення робочої напруги мережі призводить до підвищення абсолютного значення комутаційних перенапруг. Це пояснюється тим, що зі зростанням напруги збільшується запас енергії, накопиченої

в реактивних елементах мережі, що впливає на характер перебігу перехідних процесів під час комутації.

Для більш повного дослідження впливу робочої напруги було проведено аналогічні експерименти для різних значень довжини лінії електропередачі. Отримані результати узагальнено в таблиці 3.2, де наведено значення напруги до комутації  $U_1$  та максимального значення напруги після комутації  $U_2$ .

Таблиця 3.2 – Результати дослідження комутаційних перенапруг у лінії електропередачі, що працює в режимі холостого ходу, при робочій напрузі 11 кВ

Довжина лінії, км	$U_1$ , кВ	$U_2$ , кВ	$\Delta U$ , кВ
1	11,214	11,597	0,683
4	11,218	12,397	1,179
7	11,214	13,936	2,722
10	11,215	15,397	4,182

На основі результатів, наведених у таблиці 3.2, побудовано графік залежності величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі мережі 11 кВ. Отримана залежність представлена на рисунку 3.5.

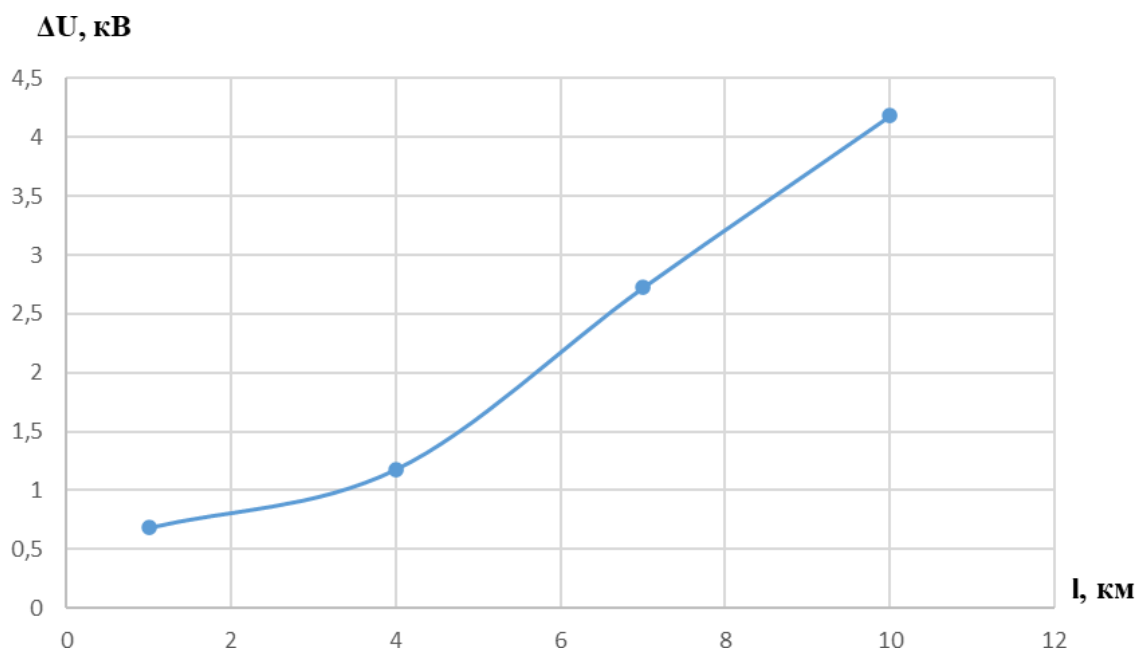


Рисунок 3.5 – Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі 11 кВ

### 3.3 Дослідження впливу величини навантаження на величину комутаційних перенапруг

Для дослідження впливу активного навантаження на величину комутаційних перенапруг було розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB Simulink. Схема моделі наведена на **рисунку 3.6**. Використання даної моделі дозволяє оцінити характер перехідних процесів під час комутації лінії електропередачі за наявності активного навантаження та визначити його вплив на рівень перенапруг.

Модель досліджуваної електричної мережі включає такі основні елементи:

- трифазне джерело живлення (Three-Phase Source);
- трифазну лінію електропередачі (Three-Phase PI Section Line);
- трифазний комутаційний апарат (Three-Phase Breaker);
- трифазне навантаження (Series RLC Load), яке в дослідженні працює в режимі активного навантаження.

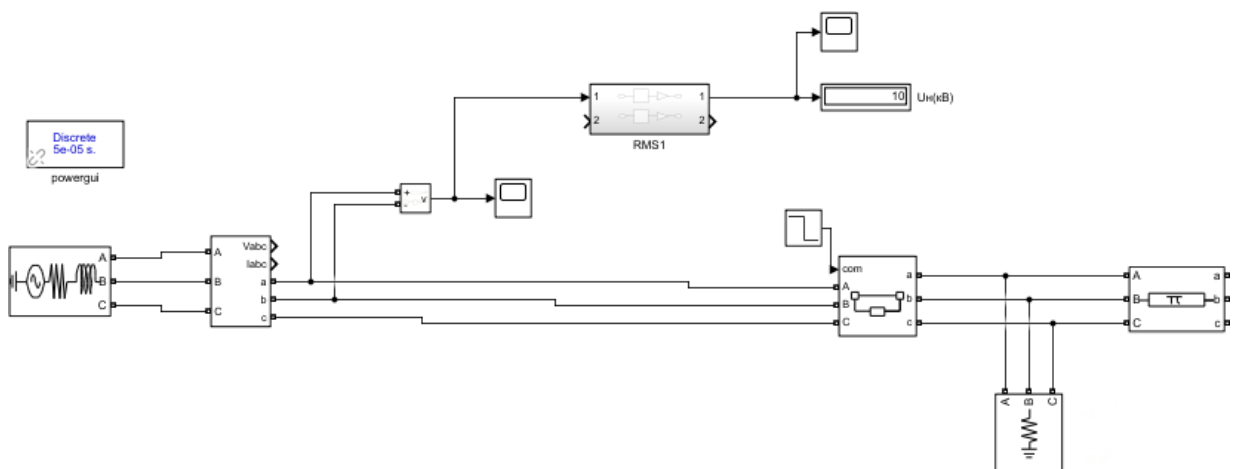


Рисунок 3.6 – Імітаційна модель лінії електропередачі з активним навантаженням

Для проведення дослідження було розглянуто лінію електропередачі довжиною 10 км при робочій напрузі мережі 10 кВ та активній потужності навантаження 6 МВт. Результати моделювання перехідного процесу, що виникає під час комутації, наведені на рисунку 3.7.

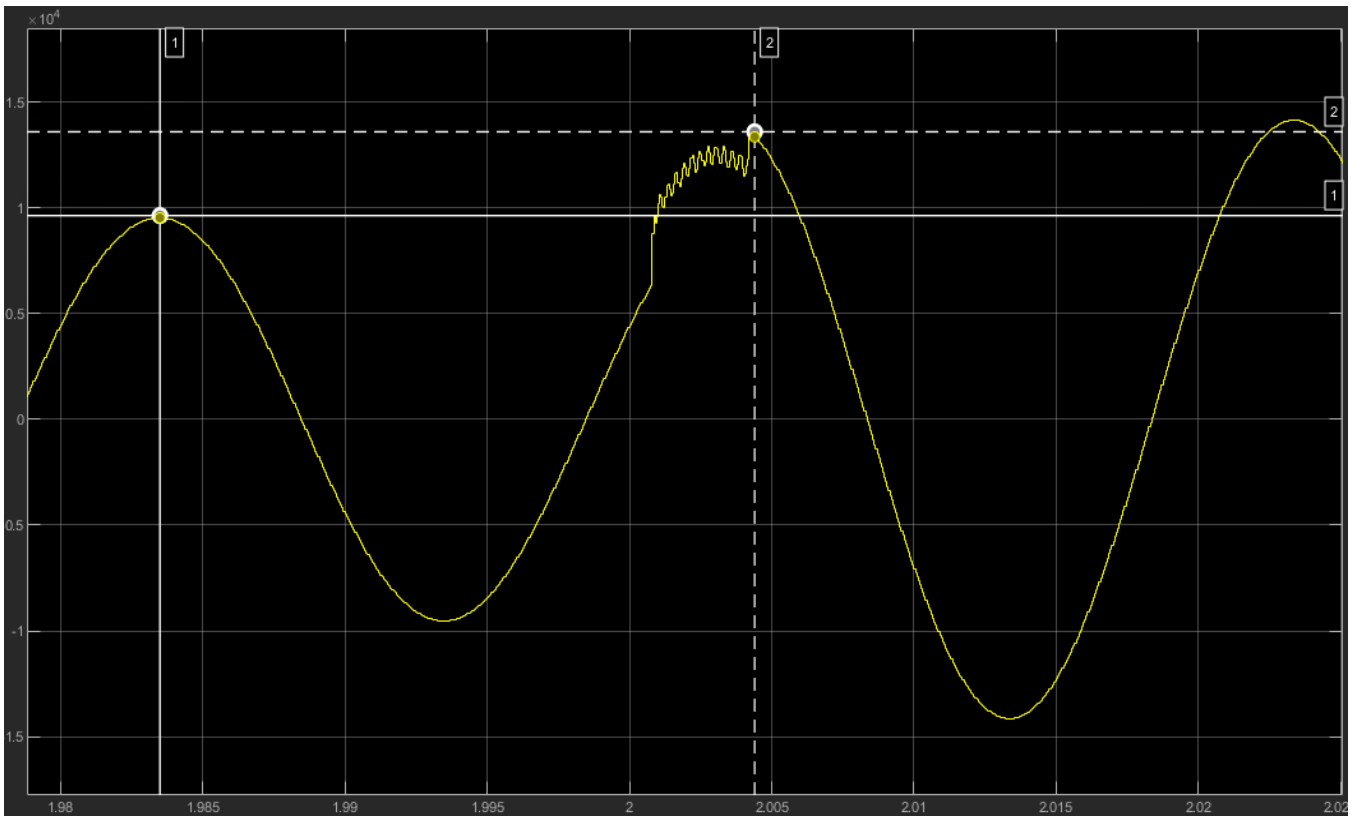


Рисунок 3.7 – Осцилограма комутаційної перенапруги під час вмикання лінії електропередачі довжиною 10 км при робочій напрузі 10 кВ та активному навантаженні 6 МВт

З аналізу отриманих осцилограм видно, що наявність активного навантаження суттєво впливає на характер перехідних процесів. Частина енергії, яка накопичується в елементах мережі, споживається навантаженням, що сприяє зменшенню амплітуди коливань напруги та обмеженню рівня комутаційних перенапруг порівняно з режимом холостого ходу.

Для підтвердження отриманих результатів було виконано серію аналогічних досліджень для різних значень довжини лінії електропередачі. Результати моделювання узагальнено в таблиці 3.3, де наведено значення напруги до комутації та максимальні значення напруги, що виникають під час перехідного процесу.

Таблиця 3.3 – Результати дослідження комутаційних перенапруг у лінії електропередачі напругою 10 кВ за наявності активного навантаження

Довжина лінії, км	U1, кВ	U2, кВ	$\Delta U$ , кВ
1	9,853	12,554	2,701
4	9,846	13,054	3,208
7	9,841	13,297	3,456
10	9,851	13,597	3,746

Аналіз результатів таблиці дозволяє оцінити вплив довжини лінії на величину комутаційних перенапруг в умовах роботи мережі під навантаженням та порівняти отримані значення з результатами, отриманими для режиму холостого ходу. Це дає можливість визначити ступінь демпфувального впливу активного навантаження на перехідні процеси в електричній мережі.

За результатами досліджень, наведеними в таблиці 3.3, побудовано графік залежності величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при наявності активного навантаження. Отримана залежність представлена на рисунку 3.8.

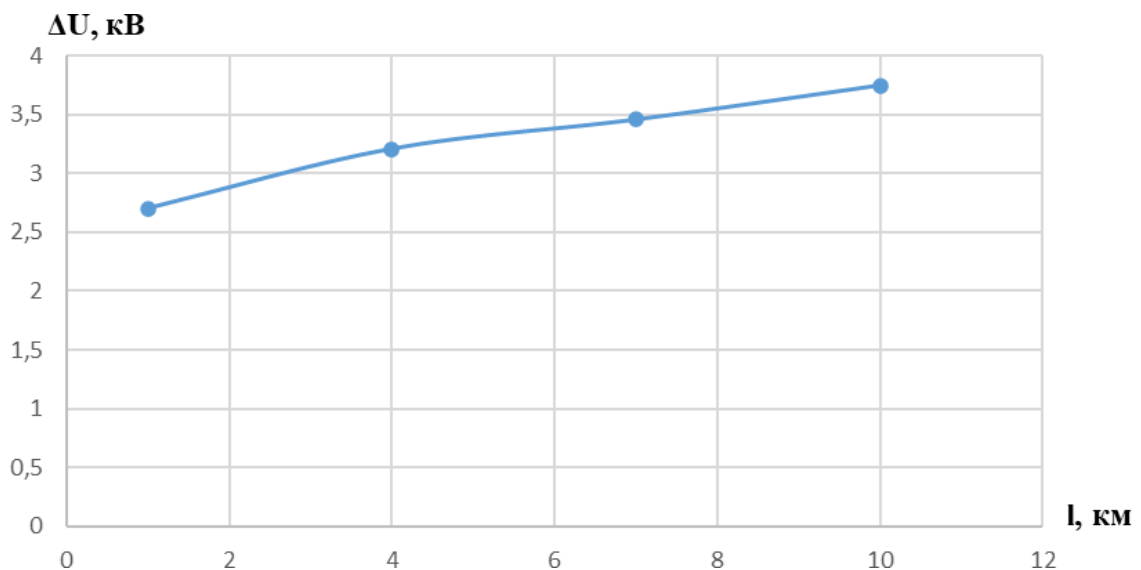


Рисунок 3.8 – Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі 10 кВ та активному навантаженні 6 МВт

Аналіз графіка свідчить, що зі збільшенням довжини лінії величина комутаційних перенапруг також зростає. Проте порівняно з режимом холостого ходу значення перенапруг є меншими, оскільки активне навантаження сприяє розсіюванню енергії перехідного процесу та зменшує амплітуду коливань напруги.

Для дослідження впливу активно-реактивного навантаження на величину комутаційних перенапруг була розроблена імітаційна модель у середовищі MATLAB Simulink, наведена на **рисунку 3.9**. Дослідження проводилося з метою оцінки впливу реактивної складової навантаження на характер перехідних процесів у лінії електропередачі.

Модель досліджуваної мережі містить ті самі основні елементи, що й модель, наведена на рисунку 3.6, а саме:

- трифазне джерело живлення (Three-Phase Source);
- трифазну лінію електропередачі типу PI (Three-Phase PI Section Line);
- трифазний комутаційний апарат (Three-Phase Breaker);
- трифазне навантаження (Series RLC Load).

Відмінністю даного дослідження є наявність не лише активної, а й реактивної складової потужності навантаження.

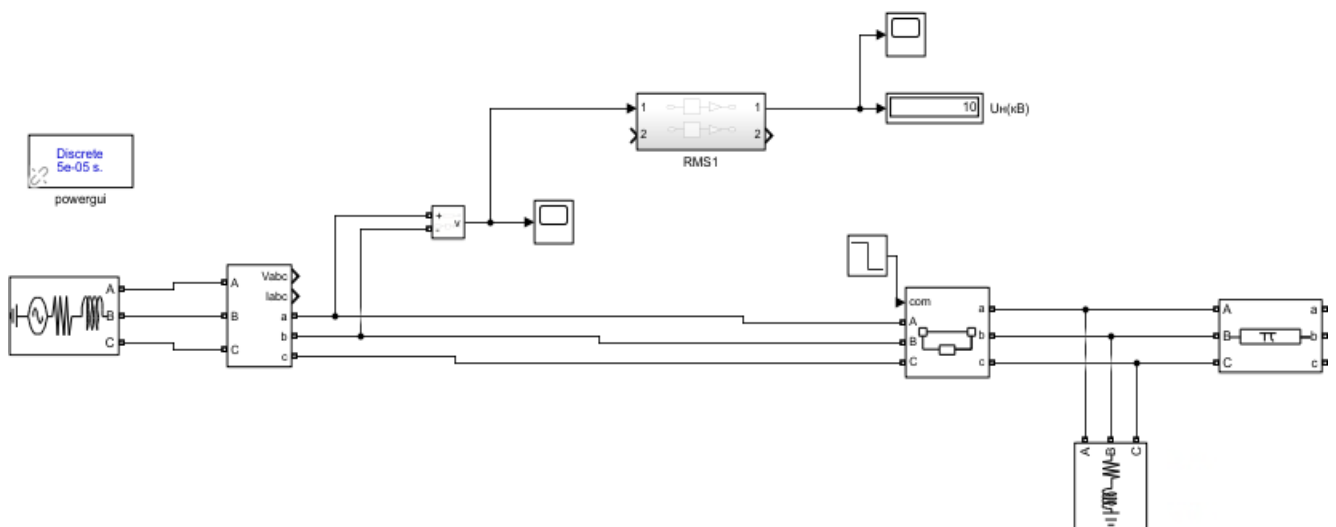


Рисунок 3.9 – Імітаційна модель лінії електропередачі з активно-реактивним навантаженням

Моделювання виконувалося для лінії довжиною 10 км при робочій напрузі 10 кВ, активній потужності навантаження 6 МВт та реактивній потужності 3 МВАр. Осцилограма перехідного процесу, що виникає під час комутації, наведена на рисунку 3.10.

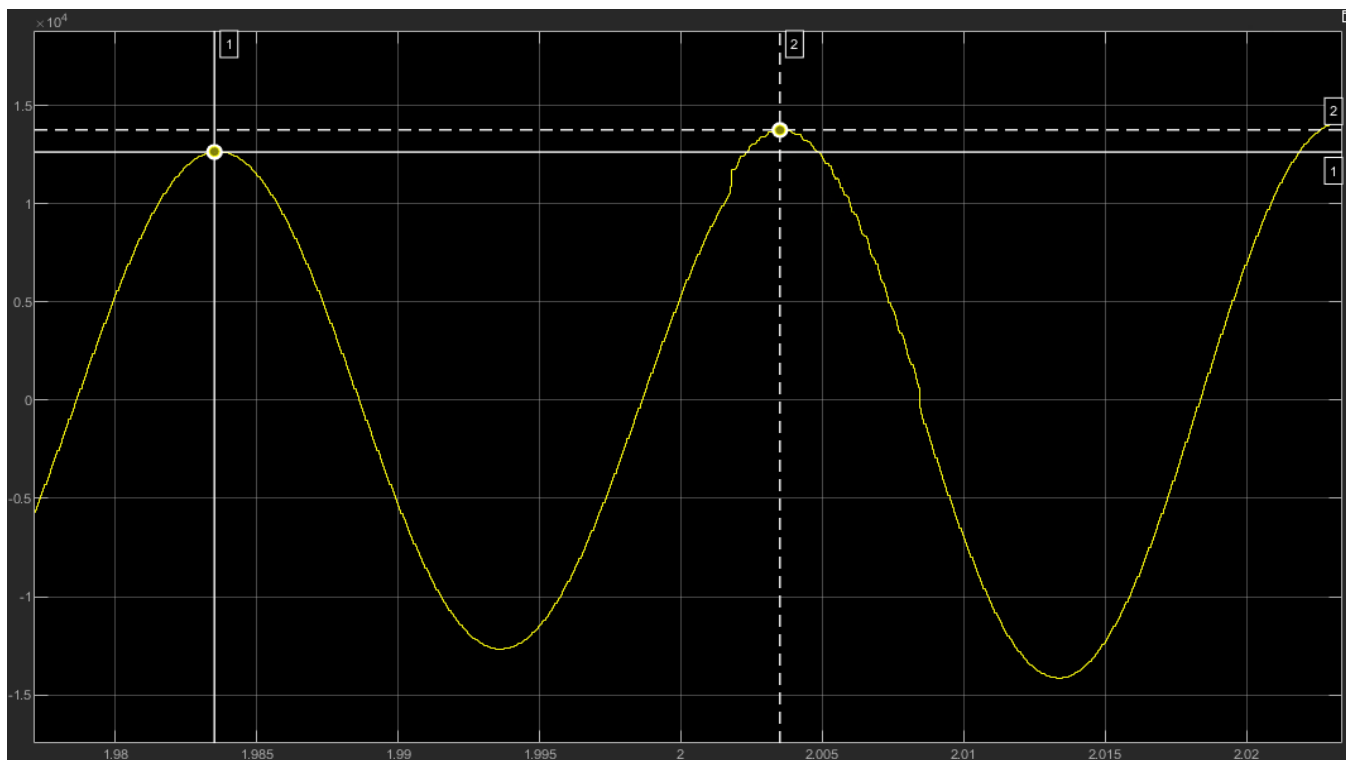


Рисунок 3.10 – Осцилограма комутаційної перенапруги під час комутації лінії довжиною 10 км при робочій напрузі 10 кВ, активному навантаженні 6 МВт та реактивному навантаженні 3 МВАр

Отримані результати показують, що наявність реактивної складової навантаження змінює характер перехідних процесів та впливає на величину комутаційних перенапруг. Це пояснюється додатковим накопиченням електромагнітної енергії в реактивних елементах мережі та навантаження, що змінює умови виникнення і затухання коливань після комутації.

Для підтвердження отриманих закономірностей були проведені аналогічні дослідження для ліній різної довжини. Результати моделювання узагальнено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати дослідження комутаційних перенапруг у лінії електропередачі напругою 10 кВ за наявності активно-реактивного навантаження

Довжина лінії, км	U1, кВ	U2, кВ	$\Delta U$ , кВ
1	12,992	13,763	0,771
4	12,987	13,814	0,827
7	12,989	13,871	0,882
10	12,991	13,986	0,995

Наведені результати дозволяють оцінити вплив довжини лінії та параметрів навантаження на величину комутаційних перенапруг, а також порівняти режими роботи мережі з активним та активно-реактивним навантаженням

За результатами моделювання, наведеними в таблиці 3.4, побудовано графік залежності величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при наявності активно-реактивного навантаження. Отримана залежність представлена на рисунку 3.11.

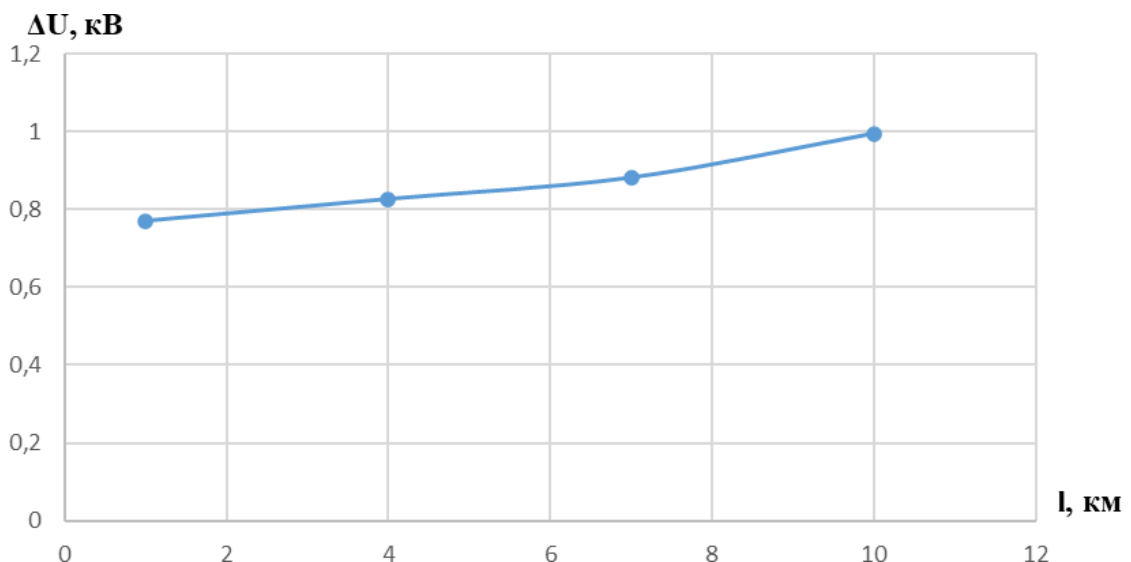


Рисунок 3.11 – Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі 10 кВ, активному навантаженні 6 МВт та реактивному навантаженні 3 МВАр



Для аналізу було розглянуто лінію довжиною 10 км при робочій напрузі 10 кВ та реактивній потужності навантаження 3 МВАр. Результати моделювання наведені на рисунку 3.13.

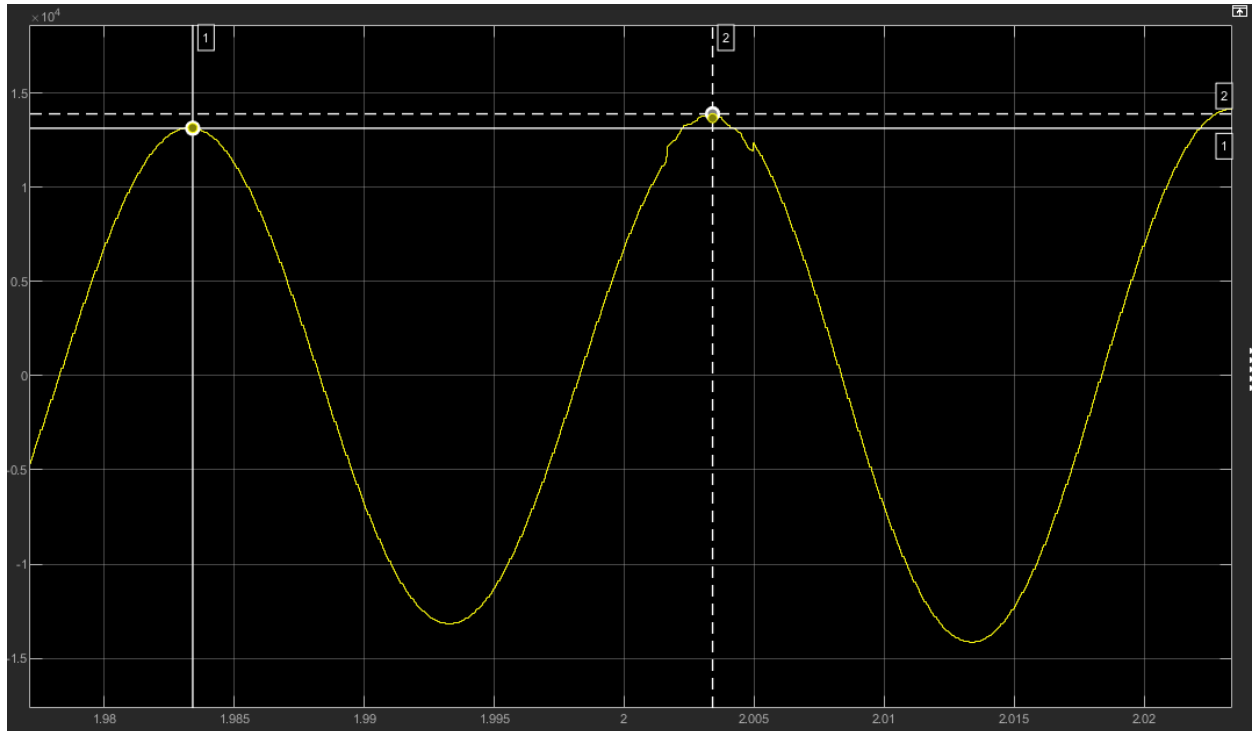


Рисунок 3.13 – Осцилограма комутаційної перенапруги під час комутації лінії довжиною 10 км при робочій напрузі 10 кВ та реактивному навантаженні 3 МВАр

Для отримання більш повної картини впливу довжини лінії на величину перенапруг було виконано серію аналогічних досліджень для різних значень протяжності ЛЕП. Отримані результати наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати дослідження комутаційних перенапруг у лінії електропередачі напругою 10 кВ за наявності реактивного навантаження

Довжина лінії, км	U1, кВ	U2, кВ	$\Delta U$ , кВ
1	13,195	13,632	0,437
4	13,163	13,732	0,569
7	13,135	13,736	0,601
10	13,135	13,897	0,762

Аналіз даних таблиці показує, що зі збільшенням довжини лінії величина комутаційних перенапруг поступово зростає. Для лінії довжиною 1 км перенапруга становить 0,437 кВ, тоді як для лінії довжиною 10 км її значення збільшується до 0,762 кВ. Це свідчить про суттєвий вплив довжини ЛЕП на характер перехідних процесів навіть за наявності лише реактивного навантаження.

За результатами, наведеними в таблиці 3.5, побудовано графік залежності величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі, який представлено на рисунку 3.14

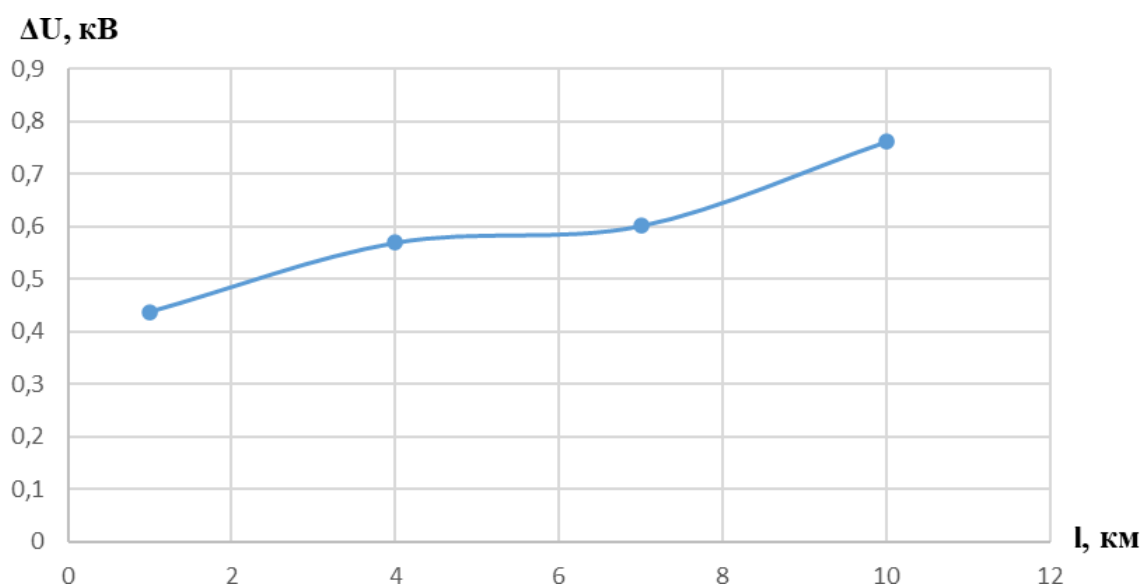


Рисунок 3.14 – Залежність величини комутаційних перенапруг від довжини лінії електропередачі при робочій напрузі 10 кВ та реактивному навантаженні 3 МВАр

З отриманого графіка видно, що зі збільшенням довжини лінії спостерігається стійке зростання величини комутаційних перенапруг. Причиною цього є збільшення запасу електромагнітної енергії в індуктивних та ємнісних елементах мережі. Реактивне навантаження додатково впливає на процес обміну енергією між елементами системи, що сприяє зростанню амплітуди коливань напруги під час комутації. Отримані результати підтверджують необхідність врахування реактивної складової навантаження при оцінюванні рівня комутаційних перенапруг та виборі засобів їх обмеження.

### **3.4 Висновки до розділу**

У третьому розділі за допомогою MATLAB Simulink досліджено вплив довжини лінії електропередачі, робочої напруги та характеру навантаження на величину комутаційних перенапруг.

Встановлено, що зі збільшенням довжини лінії та робочої напруги рівень комутаційних перенапруг зростає через збільшення запасу електромагнітної енергії в елементах мережі. Також підтверджено, що активне навантаження сприяє зменшенню перенапруг завдяки демпфуванню перехідних процесів, тоді як реактивна складова суттєво впливає на характер коливань напруги.

Отримані результати підтверджують необхідність врахування параметрів мережі та навантаження при виборі засобів захисту від комутаційних перенапруг і проектуванні електроенергетичних систем.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Заходи безпеки при монтажі енергоустановок

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [13]: 1) зі зняттям напруги; 2) без зняття напруги на струмовідних частинах і поблизу них; 3) без зняття напруги не на струмовідних частинах, що знаходяться під напругою.

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:

- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;

- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;
- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;
- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

## **4.2 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В**

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога) [13]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або перекушувати проводи

слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15— 20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрозувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті,

необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

### **4.3 Сигнально-попереджувальні пристрої і фарбування обладнання**

Для попередження про небезпеку застосовують звукові, світлові і кольорові сигнали. Сигнальні пристрої встановлюються в зонах видимості і слухового відчуття обслуговуючого персоналу. Сигнали небезпеки повинні чітко сприйматися у виробничій обстановці [13].

Нормативами визначаються сигнальні і розпізнавальні кольори. Основними сигнальними кольорами є червоний - забороняючий, засвідчуючий про безпосередню небезпеку, жовтий - зосереджуючий увагу і попереджуючий про можливу небезпеку і зелений - означаючий безпеку.

Розпізнавальними кольорами вважають зелений, червоний, синій, жовтий оранжевий, фіолетовий, коричневий, сірий.

Розпізнавальні кольори наносять на технологічне підйом-но-транспортне обладнання, трубопроводи, елементи будівельних конструкцій та інші споруди. Сигнально-попереджувальним фарбуванням (жовтими і чорними смугами) відмічаються елементи будівельних конструкцій і міжцехового транспорту. Так, жовто-чорною смугою позначаються низькі балки, виступи і перепади у площині підлоги, краю люків і колодязів, кабіни і перила кранів, вантажні гаки, бічні поверхні електрокарів, навантажувачів, візків, стріл автокранів.

Огородження небезпечних зон із зовнішнього боку фарбують в жовтий колір, із внутрішнього - в червоний.

Габарити проїздів, проходи і робочі місця на підлозі виробничих приміщень позначаються смугою чи штриховими лініями білого чи жовтого кольору.

Розпізнавальне фарбування однойменних струмоведучих шин у кожній електроустановці приймається однаковим.

При змінному струмі фаза А фарбується в жовтий колір, фаза В - зелений, фаза С - червоний, нульова (при ізолюваній чи заземленій нейтралі) - в чорний; при однофазному струмі провідник, під'єднаний до початку обмотки джерела живлення, - в жовтий, до кінця обмотки - в червоний; при постійному струмі позитивна фаза "+" - в червоний, негативна "-" – в синій, нейтральна - в білий.

Стандартами передбачена система знаків безпеки, які повинні використовуватися не тільки в промисловості, але й в інших галузях народного господарства, а також передбачені знаки, які є загальними для багатьох виробництв і професій, але у разі необхідності вони можуть бути конкретизовані із використанням графічних зображень і надписів, що застосовуються в інших стандартах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження причин виникнення, способів обмеження та факторів впливу на величину комутаційних перенапруг в електричних мережах. Було досліджено принцип роботи варисторів та нелінійних обмежувачів перенапруг, які є основними засобами захисту від імпульсних перенапруг. Розглянуто основні способи боротьби з комутаційними перенапругами, серед яких використання вакуумних та елегазових вимикачів, обмежувачів перенапруг, RC-ланцюгів, шунтувальних резисторів, струмообмежувальних реакторів і систем керованої комутації. Проведений аналіз показав, що найбільшу ефективність забезпечують нелінійні обмежувачі перенапруг та системи керованої комутації, які дозволяють суттєво знизити амплітуду перехідних процесів і підвищити надійність роботи електроенергетичного обладнання. Встановлено, що найбільш доцільним є комплексне застосування декількох засобів захисту, що забезпечує максимальне зниження рівня комутаційних перенапруг.

Виконано моделювання електричної мережі в середовищі MATLAB Simulink та досліджено вплив різних факторів на величину комутаційних перенапруг. За результатами моделювання встановлено, що одним із головних факторів є довжина лінії електропередачі. Зі збільшенням довжини лінії зростають її індуктивність та ємність, що призводить до накопичення більшої кількості електромагнітної енергії та підвищення рівня перенапруг під час комутації. Також встановлено, що збільшення робочої напруги мережі супроводжується зростанням абсолютних значень комутаційних перенапруг.

Дослідження впливу навантаження показали, що характер навантаження суттєво впливає на параметри перехідних процесів. Активне навантаження сприяє демпфуванню коливань та зменшенню амплітуди перенапруг, тоді як реактивна складова змінює умови обміну енергією між елементами мережі та впливає на характер перехідних процесів. Отримані результати підтвердили необхідність урахування параметрів мережі та режимів її роботи під час вибору засобів захисту від комутаційних перенапруг.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Leonard L. Grigsby, Electric power engineering hand book, Chapter 09, 2nd edition, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
2. R.P.P. Smitts, R. Wiggers, S. Chakraborty, H. Bannink, S. Kuivenhoven G. Sandolache, “the impact of switching capacitor banks with very high inrush current on switchgear”, CIGRE session Paris, 2012.
3. Gary W. Chang, Hunter M. Huang, JiangHong Lai, “Modeling SF6 Circuit Breaker for Characterizing Shunt Reactor Switching Transients,” IEEE transactions on power delivery, vol. 22, no. 3, July 2007.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. A. Calazans, J. N. de Lima, N. Valença, H. S. Bronzeado, “Improving System and Equipment Performance by Controlled Switching”, CIGRE session 2010.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.—К.: Аграрна освіта, 2013. —449 с..
7. Колівошко, А. М., Соловко, Д. Ю., & Філюк, Я. О. (2023). Електрична мережа з розподіленими відновлювальними джерелами енергії. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 262-262.
8. Миколишин, В., Стасів, А., Сисак, І., Бабюк, С., & Буняк, О. (2025). АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ПРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ПІСЛЯ АВАРІЙ ЧИ ПЛАНОВОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ. Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ», (October 10, 2025; Oxford, UK), 119-124.
9. Білик, Д. М., Матвієшин, М. Л., & Бабюк, С. М. (2025). Надійність розподільчих електричних мереж. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 12-14.

10. Долішній, Т. І., Стасів, А. З., & Бабюк, С. М. (2024). Шляхи підвищення надійності розподільчих електричних мереж. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 263-264..

11. Стасів А.З. Зниження втрат електричної енергії в системі електропостачання промислового підприємства. / А.З. Стасів, С.І. Романюк, І.М. Сисак // Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 11-12 грудня 2024. — Т : ТНТУ, 2024.

12. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.