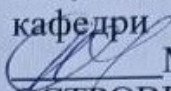


**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

«До захисту
допущено» Завідувач
кафедри

 Микола
ОСТРОВЕРХОВ

«18» 06 2025 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні
комплекси» спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
на тему: «Розробка пристроїв обмеження перенапруг у високовольтних
електричних мережах»**

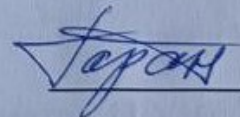
Виконав: студент IV курсу, групи ЕВ-11
Хоменко Дмитрій Віталійович

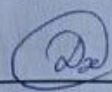


Керівник:
доцент кафедри теоретичної електротехніки,
доцент, кандидат технічних наук
Халімовський Олексій Модестович



Рецензент:
старший викладач кафедри теоретичної
електротехніки, старший викладач, кандидат
технічних наук
Гаран Ярослав Олександрович



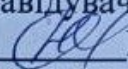
Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент 

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
 Микола
ОСТРОВЕРХОВ
«19» 05 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Хоменку Дмитрію Віталійовичу

1. Тема роботи «Розробка пристроїв обмеження перенапруг у високовольтних електричних мережах», керівник роботи
Халімовський Олексій Модестович, Доцент, Кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від
«26» 05 2025р. №1720-с
2. Термін подання студентом роботи 09.06.2025
3. Вихідні дані до роботи: мережа – 110 кВ, 50 Гц, трансформатор 110/10 кВ, пікова амплітуда грозового імпульсу – 250 кВ.
4. Зміст пояснювальної записки: 1 . Теоретичні основи перенапруг у високовольтних електричних мережах. 2. Розробка електричних моделей пристроїв обмеження перенапруг. 3. Моделювання та аналіз ефективності різних пристроїв обмеження перенапруг.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): презентація доповіді.

6. Дата видачі завдання 19.05.2025

Календарний план-графік

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка керівника про виконання або не виконання
1	Аналіз літературних джерел по темі	19.05.2025-22.05.2025	
2	Теоретичні основи перенапруг у високовольтних електричних мережах	23.05-27.05	
3	Розробка електричних моделей пристроїв обмеження перенапруг	28.05-01.06	
4	Моделювання та аналіз ефективності різних пристроїв обмеження перенапруг	02.06-07.06	
5	Оформлення роботи	08.06-09.06	

Студент



Дмитрій ХОМЕНКО

Керівник роботи



Олексій ХАЛІМОВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 64 аркушах, містить 23 рисунка та 21 літературне посилання.

Об'єкт дослідження – пристрої обмеження перенапруг, призначені для захисту елементів високовольтних електричних мереж від атмосферних перенапруг.

Предмет дослідження – математичне та імітаційне моделювання роботи пристроїв обмеження перенапруг (розрядників, ZnO-варисторів, RC-ланцюгів) у середовищі MATLAB/Simulink при впливі грозових імпульсів на елементи високовольтної мережі.

Мета дослідження – розробка та дослідження моделей пристроїв обмеження перенапруг для високовольтних мереж з метою аналізу їхньої ефективності в умовах дії грозових імпульсів.

Результати та їх новизна – розроблено та змодельовано три варіанти пристроїв обмеження перенапруг: нелінійний розрядник, ZnO-варистор та RC-ланцюг; виконано порівняльний аналіз їх ефективності в умовах дії грозового імпульсу; отримані результати дозволяють визначити оптимальні підходи до захисту трансформаторного обладнання.

Сфера застосування – високовольтні електричні мережі, трансформаторні підстанції, системи розподілу електроенергії.

Ключові слова: розрядник, ZnO-варистор, RC-ланцюг, грозовий імпульс, перенапруга, обмежувач перенапруг.

					ЕВ11.20.141.007.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Хоменко			Розробка пристроїв обмеження перенапруг у високовольтних електричних мережах	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Халімовський					4	64
						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. Контр.								
Затверд.		Халімовський						

ABSTRACT

The diploma work is completed on 64 pages, contains 23 figures and 21 references.

Object of study – Surge suppression devices designed to protect elements of high-voltage electrical networks from atmospheric and switching overvoltage's.

Subject of study – Mathematical and simulation modelling of surge arresters (arresters, ZnO varistors, RC circuits) in MATLAB/Simulink environment under the influence of lightning impulses on the elements of high-voltage network.

The purpose of the study – Development and research of models of surge suppressors for high-voltage networks in order to analyse their effectiveness under the influence of lightning impulses.

Results and their novelty – three variants of overvoltage limiting devices were developed and simulated: a non-linear arrester, a ZnO varistor and an RC circuit; a comparative analysis of their effectiveness under the conditions of a lightning impulse has been performed; the results obtained allow us to determine the optimal approaches to protecting transformer equipment.

Scope of application – high-voltage electrical networks, transformer substations, electricity distribution systems.

Keywords: arrester, ZnO varistor, RC circuit, lightning pulse, overvoltage, surge arrester.

					EB11.20.141.007.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Хоменко				Розробка пристроїв обмеження перенапруг у високовольтних електричних мережах	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Халімовський						5	64
Н. Контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Затвердив	Халімовський							

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕНАПРУГ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ.....	11
1.1 Класифікація перенапруг.....	11
1.1.1 Атмосферні перенапруги	11
1.1.2 Внутрішні (комутаційні) перенапруги.....	11
1.1.3 Зовнішні (грозові) перенапруги.....	12
1.2 Причини перенапруг	12
1.3 Методи обмеження перенапруг	14
1.3.1 Грозозахист ліній електропередачі	15
1.3.2 Використання обмежувачів перенапруг	17
1.4 Типи обмежувачів перенапруг та принцип їх роботи	19
1.4.1 Розрядники.....	19
1.4.2 Варистори (ZnO)	21
1.4.3 RC-ланцюги	23
Висновки до розділу 1	25
2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ	27
2.1 Вибір типів обмежувачів перенапруг для моделювання	27
2.2 Формування електричних схем пристроїв.....	28
2.2.1 Об'єкт захисту: модель елемента електричної мережі	28
2.2.2 Джерело перенапруг: імітація атмосферних впливів.....	31
2.2.3 Модель розрядника.....	34
2.2.4 Модель ZnO-варистора.....	37
2.2.5 Модель RC-ланцюга	40
2.3 Параметризація моделей пристроїв обмеження перенапруг	43
2.3.1 Розрядник.....	43
2.3.2 ZnO-варистор.....	44

2.3.3 RC-ланцюг	46
2.4 Аналіз вимог до захисту елементів мережі	47
Висновки до розділу 2	49
3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ	51
3.1 Аналіз роботи моделей пристроїв	51
3.1.1 Розрядник.....	52
3.1.2 ZnO-варистор.....	54
3.1.3 RC-ланцюг	55
3.2 Порівняльна оцінка ефективності пристроїв обмеження перенапруг	58
Висновки до розділу 3	59
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ОПН – обмежувач перенапруг нелінійний;

ПЛ – повітряна лінія електропередачі;

ІЕС – Міжнародна електротехнічна комісія (International Electrotechnical Commission).

ВСТУП

Сучасні високовольтні електричні мережі відіграють важливу роль у забезпеченні надійного постачання електроенергії для споживачів різного рівня – від промислових підприємств до житлового сектору. Одним із головних викликів, з якими стикаються системи електропередачі, є вплив перенапруг, що виникають внаслідок атмосферних (грозових) розрядів або комутаційних процесів. Такі перенапруги становлять серйозну загрозу для ізоляції та електрообладнання, особливо трансформаторів, що є важливими вузлами мережі. Наслідки можуть включати вихід з ладу обладнання, порушення роботи енергосистеми, економічні збитки та загрозу техногенних аварій.

Незважаючи на наявність широкого спектра пристроїв обмеження перенапруг, досвід провідних енергетичних компаній та аналіз технічної літератури свідчать про потребу в постійному вдосконаленні їх конструкцій, схем підключення та способів застосування. Особливої актуальності набуває питання коректного вибору типу пристрою обмеження для конкретних умов експлуатації, з урахуванням характеру перенапруг та характеристик об'єкта захисту. У зв'язку з цим зростає роль імітаційного моделювання, яке дозволяє оцінити ефективність різних типів захисних пристроїв без проведення дорогих натурних експериментів.

Метою даної роботи є моделювання та аналіз роботи пристроїв обмеження перенапруг у високовольтних мережах на прикладі трансформатора, який зазнає впливу грозового імпульсу. Основні зусилля спрямовані на побудову моделей таких захисних пристроїв, як нелінійний розрядник, ZnO-варистор та RC-ланцюг, у середовищі MATLAB/Simulink, з подальшим порівнянням їхньої ефективності. Обґрунтування вибору моделей базується на сучасному рівні технічного розвитку та широкому застосуванні зазначених пристроїв у промислових електричних мережах.

Результати дослідження можуть бути використані в проектуванні систем захисту високовольтного обладнання, оптимізації елементів електричних підстанцій, а також у навчальних цілях під час вивчення дисциплін, пов'язаних з електроенергетикою, високовольтною технікою та автоматизацією енергосистем.

Отже, робота має практичну цінність, відображає сучасні тенденції розвитку галузі та сприяє підвищенню надійності електропостачання.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕНАПРУГ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1 Класифікація перенапруг

Перенапруги в електричних мережах класифікуються за різними ознаками, залежно від причин їх виникнення, тривалості та місця прояву.

1.1.1 Атмосферні перенапруги

Атмосферні перенапруги виникають внаслідок природних електричних розрядів, таких як блискавка, або через атмосферні явища, які створюють високі електричні поля. Грози, зокрема, є основним джерелом таких перенапруг. Вони можуть передаватися через повітря або збуджувати електричні коливання, що спричиняють перенапруги на лініях електропередачі [1].

Характеристики атмосферних перенапруг:

- висока амплітуда – часто досягають значень в десятки кіловольт;
- коротка тривалість – від кількох мікросекунд до кількох мілісекунд;
- непередбачуваність – важко точно передбачити час і місце їх виникнення.

Захист від атмосферних перенапруг:

- встановлення блискавковідводів на високовольтних лініях;
- використання обмежувачів перенапруг для поглинання і зниження рівня напруги.

1.1.2 Внутрішні (комутаційні) перенапруги

Внутрішні перенапруги виникають при комутаційних процесах, таких як включення або виключення елементів мережі (наприклад, трансформаторів, генераторів або розподільних пристроїв). Вони можуть бути спричинені різким включенням або відключенням навантаження, зміною індуктивності чи ємності мережі [1].

Характеристики внутрішніх перенапруг:

- короткий час протікання – перенапруга триває лише кілька мілісекунд;
- висока пікова напруга – може перевищувати номінальні значення в декілька разів;
- регулярність виникнення – виникають часто при роботі мережі.

Захист від внутрішніх перенапруг:

- використання комутаційних пристроїв з можливістю гасити перенапруги;
- встановлення фільтрів та обмежувачів перенапруг на відповідних ділянках мережі.

1.1.3 Зовнішні (грозові) перенапруги

Зовнішні перенапруги виникають через прямі удари блискавки або через електричні розряди в атмосфері, що передаються на електричні лінії. Такі перенапруги можуть бути дуже потужними і здатні вивести з ладу значні частини мережі [1].

Особливості зовнішніх перенапруг:

- високий рівень напруги – досягає декількох сотень кіловольт;
- можливість передачі через кілька кілометрів – навіть при віддаленості від епіцентру грози.

Захист від зовнішніх перенапруг:

- встановлення грозозахисту (блискавковідводів, заземлення);
- використання стратегії обмеження перенапруг в критичних точках мережі.

1.2 Причини перенапруг

Перенапруги в електричних мережах можуть бути викликані різними факторами, які здебільшого зводяться до двох основних категорій: внутрішні та зовнішні перенапруги. Кожен з цих типів має свої причини та особливості, які важливо враховувати під час проектування та експлуатації електричних мереж [2].

Внутрішні перенапруги зазвичай виникають через збурення в середині електричних мереж або установок. Ці перенапруги можуть бути спричинені:

- різкою зміною навантаження;
- вимкненням короткого замикання;
- перемиканням електричних кіл;
- проходженням електричних імпульсів [3].

Різде зниження навантаження може призвести до перенапруг, оскільки швидка зміна струму може спричинити коливання в електричних колах. При розмиканні ланцюга, що був у короткому замиканні, може виникати різка зміна напруги, що спричиняє короточасну перенапругу [4].

Під час комутаційних операцій, таких як увімкнення або вимкнення електричних ліній, можуть виникати стрибки напруги через індукцію або зміни параметрів мережі.

Електричні імпульси виникають через трансформування напруги на різних етапах електричного кола, часто внаслідок великих змін струму або напруги в мережі [5].

Зазвичай ці перенапруги не є критичними для ізоляції електроустановок, оскільки рівень напруги, що виникає, не перевищує від 3,5 до 4,5 разів номінальну. Винятком можуть бути деякі чутливі побутові електронні пристрої, які можуть бути пошкоджені навіть при невеликих перевищеннях номінальної напруги (наприклад, від 15 до 20%).

Зовнішні перенапруги, на відміну від внутрішніх, виникають під впливом зовнішніх електромагнітних полів і є значно більш небезпечними для електричних мереж і обладнання. Однією з основних причин зовнішніх перенапруг є грозові розряди, які можуть впливати на електричні системи через:

- прямий удар блискавки;
- індуковані перенапруги [2].

Коли блискавка потрапляє в лінію електропередачі або підстанцію, може

виникнути дуже велика перенапруга, що викликає значні пошкодження електричних систем. Струм, що проходить через об'єкт, може досягати до 250 кА, що спричиняє перенапруги, що в десятки разів перевищують номінальну напругу. Це може привести до серйозного пошкодження ізоляції та іншого обладнання [3].

Індуковані перенапруги виникають через вплив електричного поля від грозового розряду, коли заряд передається на електричні лінії чи обладнання, що знаходяться поблизу. Індуковані перенапруги особливо небезпечні для мереж, де встановлені чутливі до перенапруг електронні пристрої або низьковольтне обладнання .

Імпульсні перенапруги, що виникають через блискавку, можуть досягати величезних значень, і, як правило, їх інтенсивність найбільша під час найбільш потужних гроз. Струм грозового розряду може досягати від 10 до 25 кА, а в окремих випадках навіть від 200 до 250 кА. Найбільшу небезпеку ці перенапруги становлять для установок з номінальною напругою до 35 кВ [3].

Зовнішні перенапруги мають великий потенціал для спричинення серйозних пошкоджень, якщо відповідний захист не був передбачений під час проєктування мережі або обладнання. Під час розряду блискавки або грозового імпульсу через електричні елементи може протікати дуже велика кількість енергії, що створює небезпеку для ізоляції та іншого обладнання.

1.3 Методи обмеження перенапруг

Перенапруги є серйозною загрозою для високовольтних електричних мереж, оскільки можуть призвести до пошкодження обладнання, порушення роботи систем та навіть виникнення аварій. Тому важливо застосовувати ефективні методи захисту, що дозволяють зменшити або усунути наслідки перенапруг у електричних мережах [6]. До таких методів належать:

- грозозахист ліній електропередачі;
- використання обмежувачів перенапруг;
- координація ізоляції в мережах.

Кожен із цих методів сприяє тому, щоб система могла ефективно захистити свою інфраструктуру та електричні елементи від негативних наслідків перенапруг.

1.3.1 Грозозахист ліній електропередачі

Грозозахист є критично важливим елементом для забезпечення безпеки високовольтних ліній електропередачі від впливу атмосферних перенапруг, зокрема від ударів блискавки. Блискавка може бути безпосередньо причиною великих перенапруг, які можуть пошкодити обладнання та викликати збої в роботі мережі [6].

Основні елементи, що складають систему грозозахисту:

- блискавковідводи, приклад якого зображений на рис. 1.1 [7];
- ізоляційні покриття;
- заземлення;
- екрани та грозозахисні кабелі.



Рисунок 1.1 – Блискавковідвід

Блискавковідводи – спеціальні конструкції, що встановлюються на високовольтних лініях і підстанціях для відведення ударів блискавки в землю. Вони мають високий електричний потенціал і здатні проводити потік електричної енергії, не даючи йому пошкодити основне обладнання [8].

Важливим елементом захисту є використання ізоляційних матеріалів, які здатні витримувати високі напруги. Це покриття на кабелях, трансформаторах і інших елементах ліній допомагає запобігти пошкодженню через перенапруги, що виникають внаслідок гроз.

Системи заземлення забезпечують ефективне відведення небажаного електричного заряду в землю. Високовольтні лінії часто оснащуються складними заземлювальними мережами, які знижують потенціал перенапруги, що виникає внаслідок грозових явищ [8].

Для ліній передачі використовуються спеціальні кабелі з екранами, що

дозволяють мінімізувати вплив атмосферних збурень на проводи, тим самим знижуючи ймовірність коротких замикань і пробойів ізоляції.

Такий комплекс заходів забезпечує стабільну роботу ліній електропередачі в умовах сильних атмосферних явищ, забезпечуючи зниження ризику пошкоджень.

1.3.2 Використання обмежувачів перенапруг

Обмежувачі перенапруг – це пристрої, призначені для захисту електричних і електронних систем від впливу високовольтних стрибків напруги, таких як грозові та комутаційні перенапруги. Вони здатні знижувати амплітуду перенапруги до безпечного рівня, таким чином захищаючи обладнання від пошкоджень або збоїв у роботі.

Перенапруги, що виникають в електричних мережах, можуть серйозно впливати на якість роботи електронних пристроїв, пошкоджувати їх та викликати вихід з ладу елементів таких установок, як випрямлячі, розподільчі щити, трансформатори та інші частини електрообладнання. Тому використання обмежувачів перенапруг є необхідним заходом для забезпечення безпеки та стабільності роботи електричних мереж [9].

Обмежувачі перенапруг можуть бути встановлені на різних етапах ланцюга, починаючи від основних джерел електропостачання до кінцевих споживачів, де необхідний максимальний захист.

Захист об'єкта від імпульсних перенапруг здійснюється за традиційними принципами селективності, що прийняті в електротехніці. Це означає, що на вводі установлюються найбільш потужні обмежувачі, а на наступних етапах — менш потужні, для забезпечення надійної роботи системи в цілому. За цією схемою обмежувачі перенапруг поділяються на такі категорії:

- група А — обмежувачі, які призначені для захисту об'єкта від надструмів, що виникають через пряме потрапляння грозового розряду в електричну мережу або від ударів блискавки поблизу ПЛ. Вони мають високий рівень захисту та здатні швидко відвести велику кількість енергії [9];

- група В — обмежувачі, які захищають від імпульсних сплесків напруги до 4 кВ. Ці пристрої використовуються для захисту основного обладнання та споживачів від менш потужних перенапруг, які виникають, наприклад, через комутаційні процеси або інші менші збурення в мережі [9];
- група С — обмежувачі, які додатково захищають від залишкових перенапруг, що проходять через попередній захист групи В. Вони спрямовують надлишкову енергію в заземлення, забезпечуючи додатковий рівень безпеки для мереж і пристроїв, при цьому обмежуючи рівень перенапруги до 2,5 кВ [9];
- група D — обмежувачі, які спеціально призначені для захисту споживачів, обладнання яких дуже чутливе до коротких надструмів або малих перенапруг. Це особливо важливо для тих пристроїв, стійкість ізоляції яких не перевищує 1,5 кВ. Ці обмежувачі призначені для точного і ефективного обмеження перенапруг, щоб запобігти навіть мінімальним пошкодженням [9].

Обмежувачі перенапруг, типові приклади яких зображені на рис. 1.2 [10, 11], працюють за принципом швидкого розряду або поглинання надлишкової енергії, що виникає при перенапругах. Коли напруга в мережі перевищує задане значення, обмежувач перенапруги миттєво реагує і проводить або поглинає енергію, тим самим знижуючи амплітуду перенапруги до безпечного рівня.



Рисунок 1.2 – Обмежувачі перенапруг

Цей процес захисту здійснюється через спеціальні елементи (наприклад,

варистори або газові розрядники), що швидко реагують на різкі стрибки напруги. В результаті обладнання, яке підключене до лінії, залишається захищеним, навіть якщо відбуваються великі імпульсні перенапруги

1.4 Типи обмежувачів перенапруг та принцип їх роботи

1.4.1 Розрядники

Розрядники є одним із найпоширеніших типів пристроїв, що застосовуються для обмеження перенапруг у високовольтних електричних мережах. Їх основна функція полягає в тому, щоб забезпечити швидке відведення надлишкової енергії перенапруги в землю, запобігаючи таким чином пробою ізоляції обладнання та забезпечуючи стабільність електроенергетичної системи.

У нормальних умовах роботи електричної мережі розрядник перебуває в неактивному стані, маючи дуже високий опір, і не проводить струм. Однак при виникненні перенапруги, яка перевищує певний пороговий рівень (наприклад, при грозовому розряді або комутаційному перенапруженні), електрична міцність проміжку між електродами розрядника порушується, і в ньому відбувається електричний пробій. В результаті формується низькоомний канал, через який струм перенапруги відводиться до землі [12].

Після зниження напруги до номінального рівня (або нижче порога утримання дуги), струм припиняється, і розрядник автоматично повертається в початковий неактивний стан. Таким чином, пристрій діє як нелінійний перемикач: із закритого стану (високий опір) у відкритий (низький опір) та навпаки [12].

Існує кілька основних типів розрядників, які розрізняються за конструкцією, принципом дії та застосуванням.

Іскрові розрядники — найбільш прості за конструкцією пристрої, що складаються з двох електродів, розділених повітряним або газовим проміжком. Переважно використовуються в повітряних лініях електропередачі. Приклад кріплення грозотросу з іскровим розрядником на лінії 750кВ зображено на рис. 1.3 [12].



Рисунок 3 – Іскровий розрядник

Розрядники з дугогасильними камерами — містять спеціальні канали або матеріали для обмеження часу горіння дуги після пробою, що зменшує тривалість перенапруги та знижує її енергетичне навантаження на ізоляцію.

Розрядники на основі метал-оксидних варисторів (ZnO) — сучасні високоефективні пристрої, що працюють без іскрового проміжку [12].

Переваги:

- швидкодія (час реагування вимірюється наносекундами);
- надійність у повторних діях;
- простота конструкції (особливо у традиційних іскрових типів).

Недоліки:

- високий рівень залишкової напруги після спрацювання;
- обмежене число ефективних спрацювань без заміни (для старіших типів);
- можливість передчасного спрацювання при імпульсах середньої амплітуди, що не загрожують ізоляції.

Розрядники широко застосовуються у всіх рівнях електроенергетичних систем — від високовольтних підстанцій до промислових електроустановок. Вони особливо ефективні для захисту трансформаторів, вимикачів, муфт кабелів, а також

повітряних та кабельних ліній електропередачі.

1.4.2 Варистори (ZnO)

Варистори на основі оксиду цинку (ZnO) є сучасним і високоефективним типом нелінійних обмежувачів перенапруг, які знайшли широке застосування у високовольтних електричних мережах завдяки своїм унікальним електричним властивостям. Їх поява значною мірою витіснила традиційні іскрові розрядники завдяки кращим показникам обмеження перенапруг, вищій надійності та довговічності. Приклади варисторів зображені на рис. 1.4 та 1.5 [13].

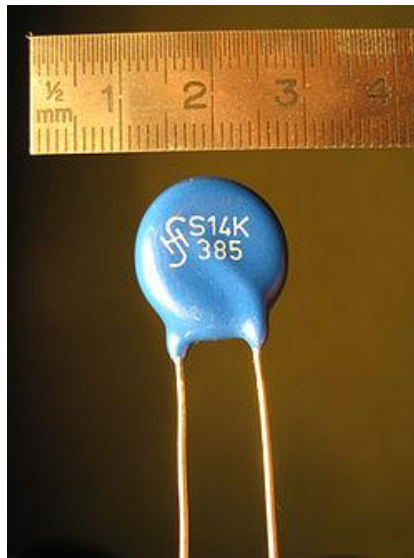


Рисунок 1.4 – Варистор (385 В)



Рисунок 1.5 – Високовольтний варистор

ZnO-варистор є електронним компонентом з вираженою нелінійною вольт-

амперною характеристикою. Його основна особливість полягає в тому, що при низьких рівнях напруги він має дуже високий електричний опір (практично не проводить струм), але при перевищенні певного порогового значення напруги його опір різко падає, що дозволяє ефективно відводити надлишковий струм до землі.

Матеріал варистора — це кераміка на основі ZnO з домішками інших оксидів (наприклад, Bi_2O_3 , CoO , MnO , Sb_2O_3), що формують в межах кристалічної структури велику кількість р-п переходів. Ці переходи забезпечують сильну нелінійність: струм зростає експоненційно із зростанням напруги. Це дозволяє варистору забезпечувати “м’яке” обмеження перенапруги із значно меншою залишковою напругою порівняно з іскровими розрядниками [13].

Обмежувач перенапруг на основі ZnO складається з кількох варисторних елементів, зібраних у серійне з’єднання. Елементи герметично захищені у корпусі з полімерного або порцелянового матеріалу, що забезпечує захист від вологи та зовнішніх забруднень. Крім варисторного стовпчика, конструкція може включати демпфуючі резистори, RC-фільтри, індикатори спрацювання та механізми роз’єднання у випадку перевантаження.

Переваги:

- низька залишкова напруга при спрацюванні, що зменшує навантаження на ізоляцію захищуваного обладнання;
- висока енергоємність — здатність поглинати великі імпульси перенапруг без деградації характеристик;
- нелінійна характеристика без іскрового проміжку — забезпечує швидке реагування без затримок;
- довговічність і стабільність параметрів упродовж усього строку експлуатації.

Недоліки:

- чутливість до перевантажень постійного характеру (наприклад, при тривалих перенапругах або витоках струму), що може призвести до теплового пробоя;
- необхідність захисту від вологи та агресивного середовища (особливо в полімерних виконаннях).

ZnO-варистори використовуються як у складових частинах обмежувачів перенапруг на електростанціях і підстанціях, так і в лініях електропередач, трансформаторних вузлах, на вводах силових трансформаторів та в електронних пристроях автоматики й релейного захисту. Їх також часто застосовують у пристроях грозозахисту промислового і побутового обладнання [13].

Особливої популярності ZnO-обмежувачі набули у системах з напругою 110–750 кВ, де класичні розрядники виявилися менш ефективними.

1.4.3. RC-ланцюги

RC-ланцюги є пасивними електричними схемами, що застосовуються в електроенергетичних системах для обмеження перенапруг шляхом пригнічення високочастотних імпульсів і згладжування перехідних процесів. Вони є простими, надійними і ефективними пристроями, особливо у випадках, коли потрібно не лише обмежити пікову напругу, а й зменшити крутизну фронту перенапруги.

RC-ланцюг складається з послідовно або паралельно з'єднаних резистора (R) та конденсатора (C), утворюючи фільтр, що гасить високочастотні складові перенапруги. Під час імпульсного перенапруження енергія імпульсу частково накопичується в електричному полі конденсатора, а частково розсіюється у вигляді тепла в резисторі. На рис. 1.6 можна побачити RC-кола інтегруючого та диференціюючого типів [14].

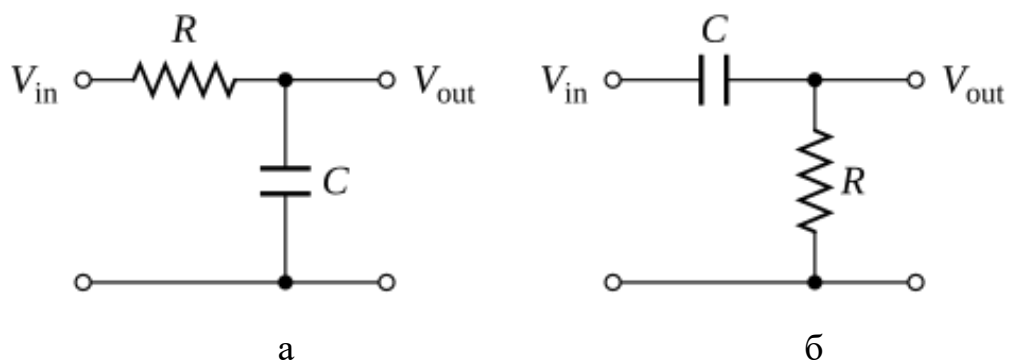


Рисунок 1.6 – Схема RC-кола інтегруючого (а) та диференціюючого (б) типів

Паралельний RC-ланцюг, приклад якого зображений на рис. 1.7 [14], як правило, менш цікавий, аніж послідовна схема. Це здебільшого пояснюється тим,

що вихідна напруга V_{out} дорівнює вхідній напрузі V_{in} – в результаті ця схема працює як фільтр на струмовому вході, а не на напрузі [14].

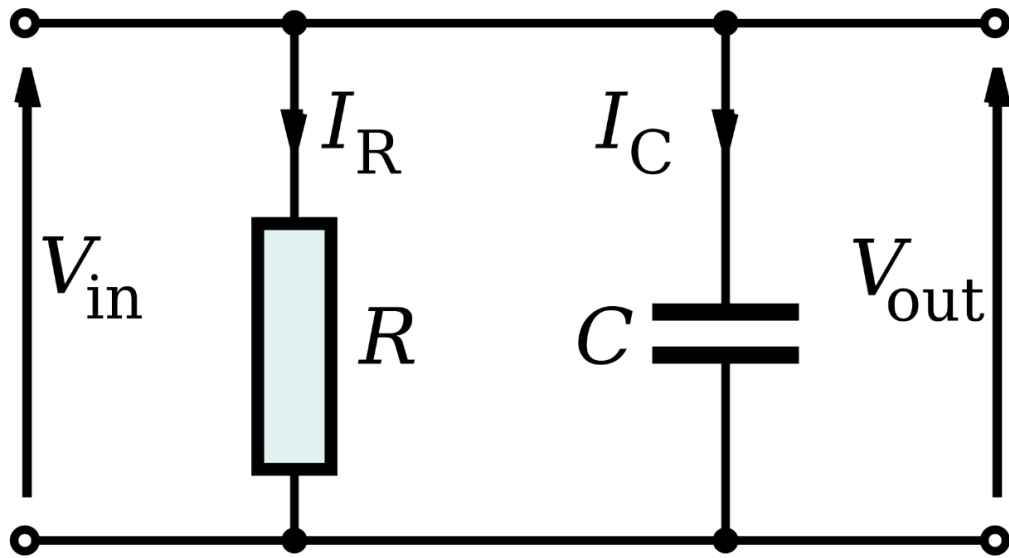


Рисунок 1.7 – Паралельний RC-ланцюг

За рахунок цього RC-ланцюги не дозволяють перенапрузі зберігати високу крутизну наростання, що особливо важливо для захисту ізоляції електрообладнання, яке є чутливим до стрімких імпульсів (наприклад, обмоток трансформаторів). У деяких схемах RC-ланцюг може бути налаштований як демпфувальний фільтр, що пригнічує коливальні процеси.

RC-ланцюги можуть бути виконані як дискретні пристрої, які монтуються безпосередньо в шафах керування, на затискачах вводів трансформаторів або в схемах підключення високовольного обладнання. У промислових умовах RC-ланцюги часто проєктуються з урахуванням індивідуальних параметрів мережі — робочої напруги, імпедансу джерела, типу навантаження та характеру можливих перенапруг [14].

В електроенергетиці також використовуються багатокаскадні RC-ланцюги (так звані імпульсні фільтри), що підвищують ефективність захисту завдяки багаторівневому обмеженню енергії перенапруг.

Основні переваги:

- зменшення крутизни фронту імпульсної перенапруги, що сприяє зниженню перенапруги індукованої на витках обмотки трансформатора;
- простота конструкції та низька вартість реалізації у порівнянні з активними або нелінійними пристроями;
- можливість точного розрахунку параметрів для конкретного режиму роботи мережі;
- сумісність з іншими захисними елементами (наприклад, із ZnO-варисторами).

Обмеження застосування:

- RC-ланцюги не здатні ефективно обмежувати перенапруги великої амплітуди, оскільки вони не перемикаються в провідний стан як варистори або розрядники;
- вони лише частково поглинають енергію перенапруги, тому не можуть забезпечити повноцінний захист при прямому ударі блискавки або при високій енергії комутаційного імпульсу;
- із часом можливе старіння елементів — особливо конденсаторів при роботі в умовах підвищених температур чи вологості.

RC-ланцюги широко застосовуються в схемах захисту обмоток трансформаторів, конденсаторних батарей, вимикачів, генераторів та високочастотних мережах зв'язку. У поєднанні з іншими обмежувачами перенапруг вони формують комбіновані системи захисту, що забезпечують як обмеження амплітуди перенапруг, так і зниження їх енергії та тривалості.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проведено комплексний теоретичний аналіз природи виникнення перенапруг у високовольтних електричних мережах та методів їх обмеження.

Проаналізовано основні класи перенапруг, серед яких ключову небезпеку становлять атмосферні (грозові) та внутрішні (комутаційні) перенапруги. Грозові

імпульси мають надзвичайно короткий фронт і високу амплітуду, що вимагає застосування високошвидкісних захисних пристроїв. Комутаційні перенапруги, навпаки, мають триваліший фронт і частіше виникають у нормальному режимі роботи системи.

Розглянуто причини виникнення перенапруг, до яких належать як природні явища (удари блискавок), так і технологічні процеси (розмикання індуктивних струмів, резонансні явища, увімкнення потужного навантаження). Залежно від причини, змінюються характеристики перенапруг, що потребує диференційованого підходу до їх обмеження.

Визначено основні методи захисту від перенапруг:

- грозозахист ліній за допомогою блискавковідводів та тросів;
- використання ОПН, зокрема метал-оксидних варисторів;
- координація ізоляції відповідно до міжнародних стандартів, зокрема ІЕС 60071.

Детально проаналізовано три основні типи пристроїв обмеження перенапруг, що будуть досліджуватись у моделюванні:

- розрядники, які забезпечують миттєве відведення енергії імпульсу;
- варистори на основі ZnO, що працюють як нелінійні резистори зі швидким спрацюванням і високою точністю обмеження;
- RC-ланцюги, що дозволяють згладжувати фронти напруги та зменшувати її вплив на ізоляцію трансформаторів.

Таким чином, теоретичне підґрунтя, викладене у розділі 1, є основою для подальшої практичної реалізації моделей пристроїв обмеження перенапруг у середовищі MATLAB та для аналізу їх ефективності при захисті елементів високовольтної мережі.

2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ

2.1 Вибір типів обмежувачів перенапруг для моделювання

Захист високовольтних електричних мереж від перенапруг є ключовим аспектом забезпечення надійної та безпечної роботи енергетичних систем. Залежно від природи перенапруг (атмосферні, комутаційні, внутрішні резонансні явища тощо) застосовуються різні типи пристроїв обмеження перенапруг, кожен з яких має власну фізичну природу дії, конструктивні особливості та ефективність в умовах певних експлуатаційних сценаріїв.

З метою проведення порівняльного аналізу та вивчення особливостей роботи різних типів обмежувачів перенапруг у даній роботі обрано три характерні представники захисних пристроїв для моделювання в середовищі MATLAB/Simulink:

- іскровий розрядник – пристрій дугового типу, що забезпечує захист шляхом утворення електричної дуги при досягненні критичного рівня напруги. Після пробного іскрового проміжку надлишкова енергія перенапруги відводиться у землю. Такий пристрій ефективний при короткочасних імпульсних перенапругах, зокрема атмосферного походження, проте має обмежену точність спрацьовування та невисоку стійкість до багаторазових імпульсів [12];
- нелінійний обмежувач на основі оксиду цинку (ZnO-варистор) – напівпровідниковий пристрій без іскрового проміжку, що характеризується сильно нелінійною вольт-амперною характеристикою. При перевищенні порогової напруги провідність варистора різко зростає, що дозволяє ефективно обмежити перенапругу без пошкодження ізоляції. Такі обмежувачі мають високу швидкодію, точність спрацьовування, стабільні параметри та здатність до багаторазового використання, що забезпечує їхнє широке застосування в сучасних мережах [13];
- RC-ланцюг – пасивна комбінація резистора і конденсатора, що використовується для згладжування імпульсів перенапруги. Такий ланцюг не

виконує функцію прямого обмеження перенапруг, проте ефективно зменшує крутизну фронту імпульсу, амплітуду та частково розсіює енергію. RC-ланцюги доцільно застосовувати для захисту від комутаційних перенапруг і зменшення електромагнітних завад, особливо у поєднанні з іншими типами обмежувачів [14].

Вибір саме цих трьох типів обумовлений їхньою репрезентативністю, різноманітністю принципів дії та широким застосуванням у практиці захисту високовольтних мереж. Це дозволяє охопити як дугові, так і напівпровідникові та пасивні способи обмеження перенапруг, а також порівняти їх ефективність і доцільність у різних режимах роботи.

Подальше моделювання кожного з цих пристроїв буде реалізовано у середовищі MATLAB/Simulink з урахуванням їхніх характерних вольт-амперних властивостей, динаміки спрацьовування та впливу на параметри електричної мережі в умовах дії імпульсних навантажень.

2.2 Формування електричних схем пристроїв

2.2.1 Об'єкт захисту: модель елемента електричної мережі

У якості об'єкта захисту в моделі розрядника у даній роботі використовується силовий трансформатор, що є ключовим елементом високовольтної електричної мережі. Для моделювання його поведінки в умовах впливу імпульсних перенапруг застосовано компонент Linear Transformer із бібліотеки Simscape > Electrical > Specialized Power Systems > Power Grid Elements середовища MATLAB/Simulink.

Цей блок дозволяє моделювати дво- або триобмотковий трансформатор з урахуванням:

- активних опорів обмоток (R_1 , R_2);
- розсіювальних індуктивностей (L_1 , L_2);
- магнітної гілки (R_m , L_m), що лінійно моделює намагнічувальні характеристики осердя [15].

У моделі використано двообмотковий трансформатор з наступними

параметрами в одиницях СІ:

- Nominal power and frequency (номінальна потужність і частота) – трансформатор розраховано на потужність 25 МВА при частоті 50 Гц;
- Winding 1 voltage (номінальна напруга обмотки ВН) – 110 000 В;
- Winding 1 resistance R1 (опір обмотки ВН) – 4.32 Ом;
- Winding 1 inductance L1 (індуктивність обмотки ВН) – 0.4586 Гн;
- Winding 2 voltage (номінальна напруга обмотки НН) – 10 000 В;
- Winding 2 resistance R2 (опір обмотки НН) – 0.36 Ом;
- Winding 2 inductance L2 (індуктивність обмотки НН) – 0.04586 Гн;
- Magnetizing resistance Rm (опір намагнічування) – 1.08×10^6 Ом;
- Magnetizing inductance Lm (індуктивність намагнічування) – 2866 Гн.

Відповідні параметри цього трансформатора можна побачити на рис. 2.1.

Block Parameters: Linear Transformer

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units: SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:

[25e6 50] [25000000,50]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(H)]:

[110000 4.3218 0.45857] [1.1e+05,4.3218,0.45857]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(ohm) L2(H)]:

[10000 0.7938 0.084225] [10000,0.7938,0.084225]

☐ Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(ohm) L3(H)]:

[3.15e+05 0.7938 0.084225]

Magnetization resistance and inductance [Rm(ohm) Lm(H)]:

[1.0804e+06 2866] [1080400,2866]

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Рисунок 2.1 – Параметри елемента Linear Transformer

Компонент Linear Transformer дозволяє врахувати основні електромагнітні характеристики трансформатора – опори та індуктивності обмоток, а також магнітні втрати через магнітопровід. Модель трансформатора реалізована з використанням параметрів в одиницях SI, що забезпечує фізичну достовірність результатів моделювання та адекватність реакції на короткочасні імпульсні впливи [15].

У схемі моделі розрядника первинна (високовольтна) обмотка трансформатора з'єднана з джерелом перенапруги та обмежувальним пристроєм, а вторинна (низьковольтна) – з вимірювальними приладами, зокрема Voltage Measurement, що дозволяє спостерігати зміну напруги під час проходження імпульсу. Таке підключення дає змогу адекватно оцінити ефективність захисного пристрою та ступінь впливу перенапруги на навантаження.

Таким чином, використання Linear Transformer у складі моделі забезпечує більш реалістичне представлення електромагнітних процесів у мережі та сприяє детальному аналізу роботи розрядника в умовах аварійних імпульсів.

У якості об'єкта захисту в моделях варистора та RC-ланцюга використовується Ideal Transformer з бібліотеки Simscape > Foundation Library > Electrical > Electrical Elements. Цей компонент реалізує ідеальну модель трансформатора, яка не враховує втрати потужності, паразитні ємності або індуктивності, а також не моделює магнітне насичення.

Основою моделі є такі рівняння:

$$V_1 = N \cdot V_2, I_2 = N \cdot I_1,$$

де V_1 та V_2 – напруги на первинній і вторинній обмотках, В;

I_1 та I_2 – відповідні струми, А;

N – коефіцієнт трансформації (співвідношення кількості витків первинної та вторинної обмоток) [16].

Обрані параметри для елемента Ideal Transformer зображені на рис. 2.2.

NAME	VALUE
Parameters	
> Winding ratio	11
> Initial Targets	
Nominal Values	
☐ Primary current	
☒ Primary voltage	
Value	110 kV
☐ Secondary current	
☒ Secondary voltage	
Value	10 kV

Рисунок 2.2 – Параметри елемента Ideal Transformer

Завдяки простоті реалізації, Ideal Transformer доцільно застосовувати в схемах, де важливе лише співвідношення напруг або струмів, а вплив реальних конструктивних параметрів трансформатора (опори, індуктивності, втрати) є другорядним. У даному дослідженні його використано для масштабування напруги до рівня, на якому можливо ефективно аналізувати роботу пристроїв обмеження перенапруг – варистора та RC-ланцюга – без надлишкового ускладнення моделі.

2.2.2 Джерело перенапруг: імітація атмосферних впливів

Для імітації перенапруг у схемах моделювання використано елемент Controlled Voltage Source (Кероване джерело напруги), який подає напругу на трансформатор у вигляді керованого сигналу. У дипломній роботі використано два типи цього блоку з різних бібліотек залежно від конкретної моделі пристрою обмеження перенапруг.

Перший варіант джерела напруги застосовується лише в електричній схемі розрядника (Surge Arrester), оскільки сама схема побудована на компонентах бібліотеки Simscape > Electrical > Specialized Power Systems. Цей блок має назву:

Controlled Voltage Source (Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Sources)

– Кероване джерело напруги (спеціалізовані енергетичні системи) [17].

Цей блок перетворює вхідний сигнал із середовища Simulink на відповідну напругу джерела. Згенерована напруга повністю визначається вхідним сигналом.

Основні характеристики:

- підтримка ініціалізації джерела (Initial amplitude, phase, frequency);
- можливість задання типу джерела (AC або DC);
- підтримка вимірювань (наприклад, напруги);
- вхідний сигнал має бути комплексним у режимі phasor simulation, інакше – звичайним часозалежним у стандартному режимі моделювання [17].

Порти:

- s – керуючий сигнал (Simulink);
- +, - – електричні виводи (спеціалізовані електричні).

Параметри блоку:

- Initialize (ініціалізація джерела) – on;
- Source type (тип джерела) – AC;
- Initial amplitude (V) (початкова амплітуда, В) – 0;
- Initial phase (deg) (початкова фаза, градуси) – 0;
- Initial frequency (Hz) (початкова частота, Гц) – 0;
- Measurements (вимірювання) – None [17].

Окрім джерела з бібліотеки Specialized Power Systems, в інших схемах моделювання (для ZnO-варистора та RC-ланцюга) використовується блок Controlled Voltage Source (Кероване джерело напруги) із бібліотеки Simscape > Foundation Library > Electrical > Electrical Sources.

Цей блок представляє ідеальне джерело напруги, що створює напругу, рівну значенню вхідного фізичного сигналу. На відміну від джерела з Specialized Power Systems, цей блок не має початкових параметрів напруги або частоти – вся поведінка повністю визначається сигналом на вхідному фізичному порту.

Основна формула:

$$V = V_s,$$

де V_s – значення керувального сигналу, поданого на вхід v_T [18].

Блок має такі порти:

- v_T (Voltage control signal, фізичний сигнал) – керуючий вхід, який визначає миттєве значення напруги;
- “+, –” (Positive/Negative terminal, електричні порти) – силові виводи джерела [18].

Для моделювання атмосферної перенапруги реалізовано стандартний імпульс типу 1.2/50 мкс згідно з рекомендаціями стандарту IEC 60060. Такий імпульс формується у блоці MATLAB Function, де математично описується експоненційна різниця зростаючої та спадної складової. Параметри елемента MATLAB Function, що використовуватиметься у схемах пристроїв обмеження перенапруг, зображені на рис. 2.3.

```

1  function y = fcn(t)
2      % Параметри імпульсу
3      Vm = 250e3;      % Пікова амплітуда (250 кВ)
4      tau1 = 1.2e-6;   % Час фронту (1.2 мкс)
5      tau2 = 50e-6;    % Час спаду (50 мкс)
6      % Формула стандартної грозової хвилі (IEC 60060)
7      if t >= 0
8          y = Vm * (exp(-t/tau2) - exp(-t/tau1));
9      else
10         y = 0;
11     end
12 end
13

```

Рисунок 2.3 – Параметри елемента MATLAB Function

Цей блок під'єднується разом із Sine Wave (джерело змінної напруги), параметри якого зображені на рис. 2.4, до Sum, вихід якого приєднується безпосередньо до вхідного порту v_T блоку Controlled Voltage Source.

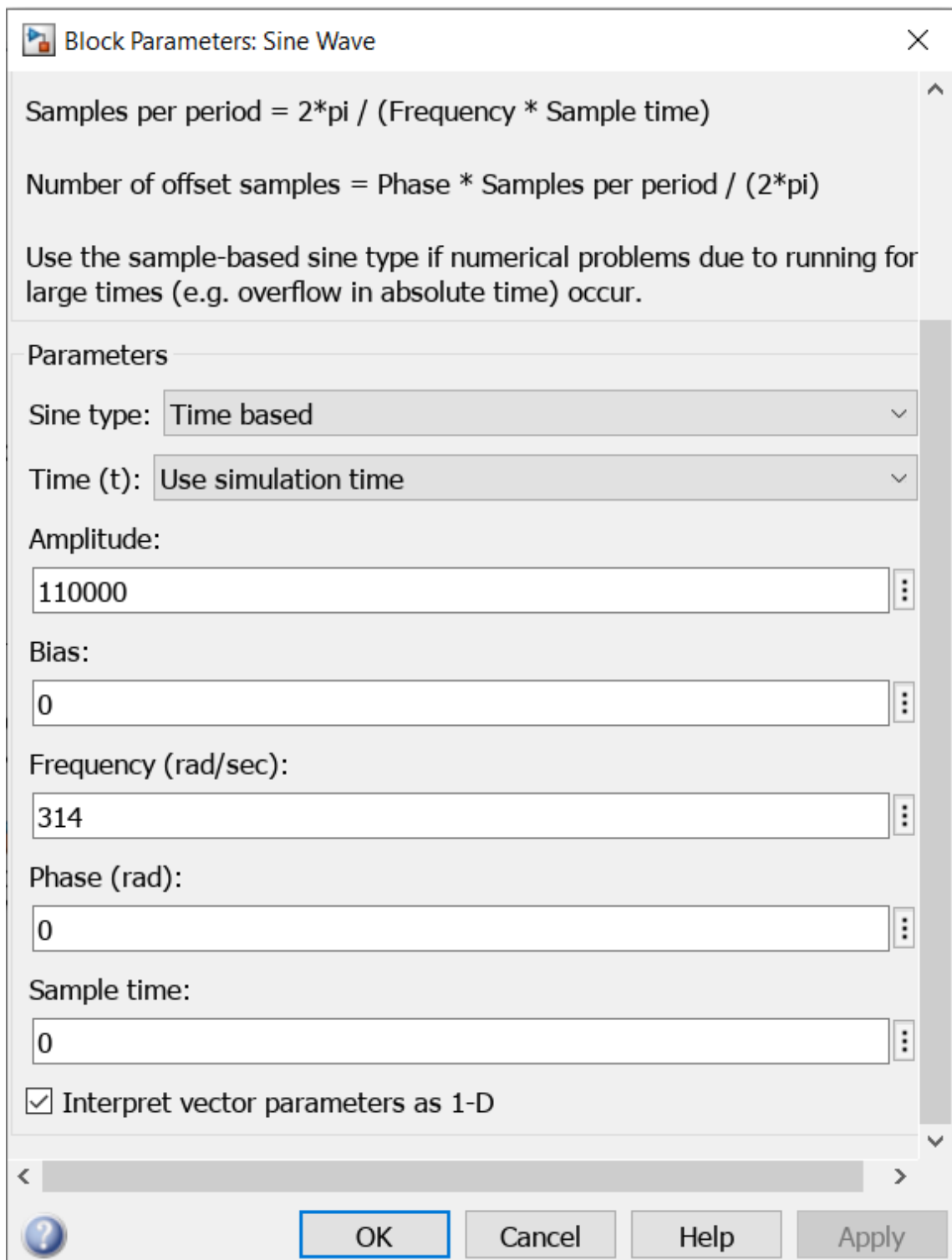


Рисунок 2.4 – Параметри елемента Sine Wave

2.2.3 Модель розрядника

Для моделювання нелінійного розрядника у середовищі MATLAB/Simulink використано блок Surge Arrester з бібліотеки Simscape > Specialized Power Systems > Passives. Цей компонент моделює поведінку розрядника на основі

металоксидного (ZnO) матеріалу, який широко застосовується для захисту обладнання у високовольтних електричних мережах [19].

Компонент дозволяє задання багатосегментної вольт-амперної характеристики, що забезпечує точне відтворення реальної поведінки пристрою.

Блок Surge Arrester дозволяє задавати багатосегментну вольт-амперну характеристику (BAX), що дозволяє враховувати сильну нелінійність та зміну струмопровідності залежно від рівня перенапруги. Така точна параметризація робить компонент оптимальним для відтворення поведінки розрядника у випадках короточасних атмосферних імпульсів напруги, характерних для мережі з номінальною напругою 110 кВ.

Компонент вмикається паралельно до об'єкта, який потрібно захистити від перенапруг (наприклад, трансформатора або ділянки повітряної лінії). Для спостереження за режимами роботи моделі підключаються датчики напруги та струму, сигнали з яких передаються до Scope для візуалізації.

Для аналізу роботи пристрою обмеження перенапруг у середовищі MATLAB/Simulink було побудовано спрощену модель високовольтного розрядника (surge arrester). Метою цієї моделі є перевірка його електричних характеристик за умови дії перенапруги, яка імітується джерелом змінного струму. Електрична схема моделі розрядника зображена на рис. 2.5.

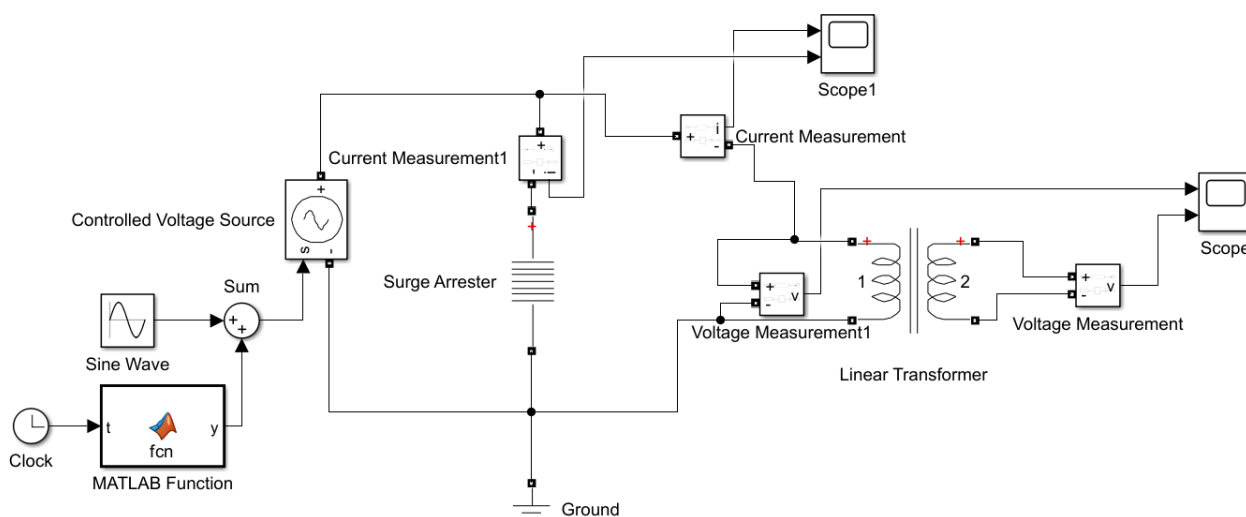


Рисунок 2.5 – Модель розрядника в програмному пакеті MATLAB

Модель реалізована у середовищі Simulink з використанням бібліотеки Specialized Power Systems, та включає наступні елементи:

1. MATLAB Function – формує короткочасну імпульсну складову напруги (атмосферний розряд);
2. Linear Transformer – трансформатор, що представляє об'єкт захисту. Він моделює типові високовольтні обладнання, підключене до мережі 110 кВ;
3. Sine Wave – генерує синусоїдальний сигнал, що відображає дію змінної складової напруги мережі;
4. Current Measurement – вимірює струм, амперметр;
5. Voltage Measurement – вимірює напругу, вольтметр;
6. Surge Arrester – розрядник, реалізований на основі нелінійної характеристики металоксидного елемента, обмежує амплітуду перенапруги та запобігає пошкодженню захищеного обладнання, параметри якого зображені на рис. 2.6;

Block Parameters: Surge Arrester

Surge Arrester (mask) (link)
Implements a metal-oxide surge arrester.

Parameters

Protection voltage Vref(V):
200e+03

Number of columns:
2

Reference current per column Iref(A):
500

Segment 1 characteristics [k1 alpha1]:
[.955 50] [0.955,50]

Segment 2 characteristics [k2 alpha2]:
[1.0 25]

Segment 3 characteristics [k3 alpha3]:
[.9915 16.5] [0.9915,16.5]

Measurements: None

OK Cancel Help Apply

Рисунок 2.6 – Параметри елемента Surge Arrester

7. Scope – осцилограф, який відображає значення напруги та струму у часовій області. Дозволяє візуально оцінити ефективність роботи розрядника під час імпульсу;
8. Clock – генерує сигнал поточного часу моделювання. Його значення використовується у функціональному блоці для побудови імпульсної складової перенапруги;
9. Sum – сумує основний синусоїдальний сигнал та імпульс від MATLAB Function для формування повного сигналу напруги;
10. Ground – електричне заземлення.

2.2.4 Модель ZnO-варистора

Для моделювання ZnO-варистора у середовищі MATLAB/Simulink обрано компонент Varistor із бібліотеки Simscape > Electrical > Passive. Цей елемент забезпечує точне представлення нелінійної вольт-амперної характеристики, яка притаманна металоксидним варисторам, зокрема на основі ZnO.

Математично варистор описується виразом:

$$I = k \cdot V^{\alpha} + c,$$

де: I – струм через варистор, А;

V – прикладена напруга, В;

k, c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від конструкції варистора;

α – показник степеневі залежності, що характеризує рівень нелінійності (типіві значення – від 25 до 50) [20].

Для моделювання ZnO-варистора у середовищі MATLAB/Simulink було побудовано електричну схему, що зображена на рис. 2.7, з використанням елементів бібліотек Simscape та Simscape Electrical.

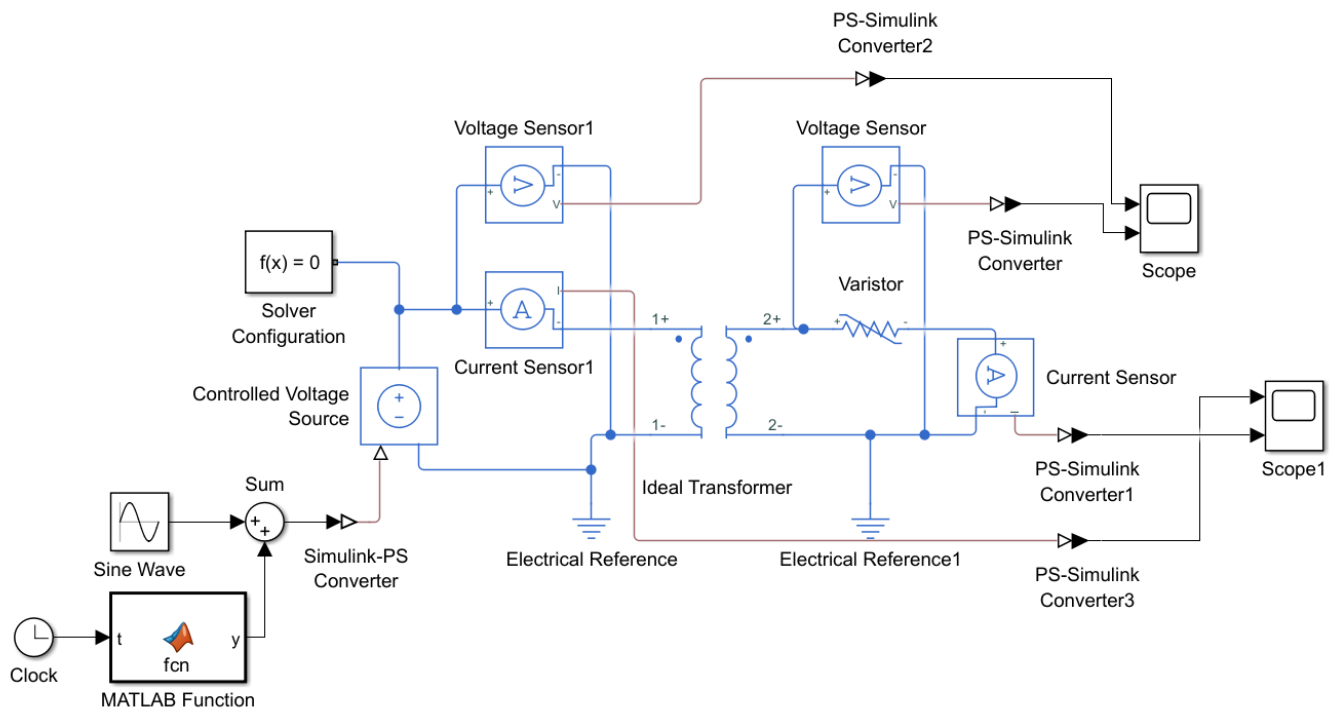


Рисунок 2.7 – Модель варистора у програмному пакеті MATLAB

Модель складається з таких елементів:

- Clock – генерує поточне значення часу симуляції, яке подається на функціональний блок для формування імпульсу перенапруги;
- MATLAB Function – реалізує математичну модель імпульсу атмосферної перенапруги у вигляді функції часу. Функція повертає імпульс заданої форми та тривалості;
- Sine Wave – генерує синусоїдальну напругу, що імітує нормальну роботу мережі змінного струму;
- Sum – виконує підсумовування сигналів від Sine Wave та MATLAB Function, об'єднуючи стандартний режим роботи та імпульс перенапруги;
- Controlled Voltage Source – кероване джерело напруги, яке перетворює вхідний сигнал (результат сумування) на електричну напругу в Simscape-доміні;
- Solver Configuration – задає параметри чисельного розв'язання моделі, необхідний для коректної роботи фізичних блоків;

- Simulink-PS Converter – перетворює сигнали з домену Simulink у фізичний сигнал для подачі на Controlled Voltage Source;
- PS-Simulink Converter – виконує зворотнє перетворення фізичних сигналів у сигнали Simulink для подальшої обробки або візуалізації;
- Ideal Transformer – трансформатор, що представляє об’єкт захисту;
- Varistor – модель ZnO-варистора з параметризацією Power-law, параметри якого зображені на рис. 2.8;

Block Parameters: Varistor

Varistor ☒ Auto Apply

Settings Description

NAME	VALUE
▼ Main	
Parameterization	Power-law ▼
> Leakage to normal voltage transition	130 kV ▼
> Normal to upturn voltage transition	300 kV ▼
> Leakage-mode resistance	3e8 Ohm ▼
> Normal-mode power-law exponent	45
> Upturn-mode resistance	0.07 Ohm ▼
> Terminal resistance	100e-6 Ohm ▼
Capacitance	4.4 nF ▼
> Initial Targets	
> Nominal Values	

Рисунок 2.8 – Параметри елемента Varistor

- Voltage Sensor – вольтметр;
- Current Sensor – амперметр;
- Electrical Reference – заземлення;

- Scope – осцилограф для візуалізації результатів моделювання, зокрема напруги та струму.

2.2.5 Модель RC-ланцюга

RC-ланцюг є простим, але ефективним засобом згладжування перенапруги та обмеження її швидкості наростання. У середовищі MATLAB Simulink модель RC-ланцюга реалізується на основі пасивних елементів – резистора та конденсатора, з'єднаних послідовно або паралельно залежно від цільової функції обмеження. У даній роботі використовується паралельне з'єднання резистора та конденсатора.

У Simulink реалізація виконується з використанням елементів бібліотеки Simulink та Simscape > Foundation Library > Electrical > Electrical Elements. Обрана модель є простою у реалізації, придатною для адаптації до напруги 110 кВ та достатньо точною для моделювання процесу обмеження імпульсної перенапруги.

Для реалізації моделі RC-ланцюга в середовищі MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) було побудовано паралельне з'єднання резистора та конденсатора, що моделює поширений тип пристрою обмеження перенапруг у високовольтних мережах. Такий ланцюг, електрична схема якої зображена на рис. 2.9, дозволяє ефективно поглинати енергію перенапруг короткої тривалості завдяки поєднанню опору та ємності, що забезпечує фільтрацію високочастотних компонентів.

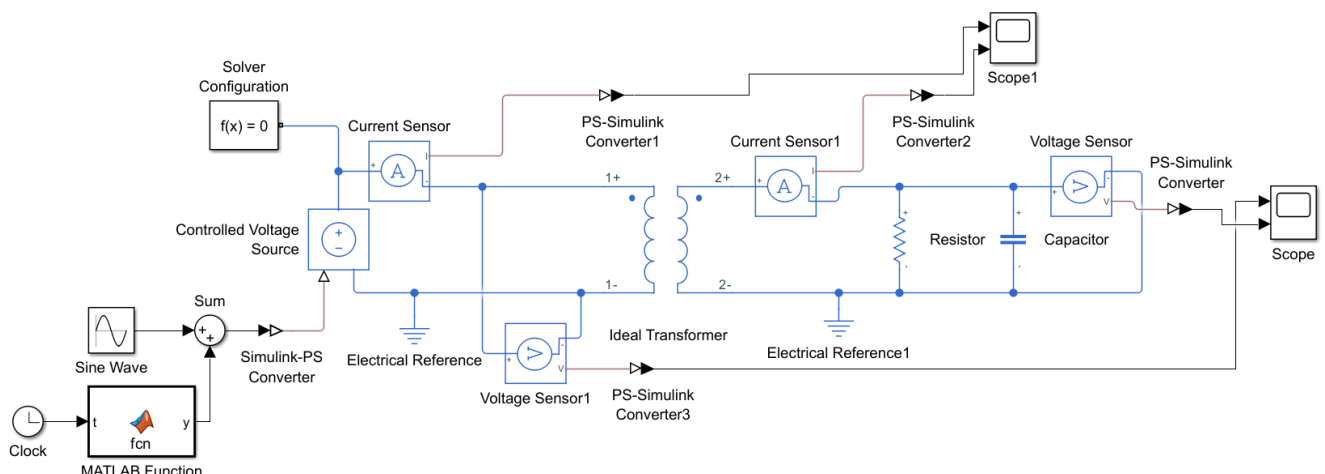


Рисунок 2.9 – Модель паралельного RC-ланцюга в програмному пакеті MATLAB

Модель складається з таких елементів:

- Clock – забезпечує інформацію про час моделювання для синхронізації побудови сигналів;
- MATLAB Function – використовується для задання математичного виразу грозового імпульсу;
- Sine Wave – джерело змінної напруги;
- Sum – дозволяє об'єднати декілька джерел сигналів;
- Controlled Voltage Source – генерує відповідну форму напруги для живлення схеми;
- Ideal Transformer – трансформатор, що представляє об'єкт захисту;
- Resistor і Capacitor – формують RC-ланцюг, з'єднаний паралельно вторинній обмотці трансформатора, параметри яких зображені на рис. 2.10 та 2.11;

NAME	VALUE
Parameters	
> Resistance	1 MOhm
> Initial Targets	
> Nominal Values	

Рисунок 2.10 – Параметри елемента Resistor

NAME	VALUE
Parameters	
> Capacitance	1e-6 F
> Series resistance	1e-6 Ohm
> Parallel conductance	0 1/Ohm
> Initial Targets	
> Nominal Values	

Рисунок 2.11 – Параметри елемента Capacitor

- Voltage Sensor – вольтметр;
- Current Sensor – амперметр;
- Electrical Reference – заземлення;
- PS-Simulink Converter – перетворювачі фізичних сигналів у сигнали Simulink для подальшої візуалізації;
- Simulink-PS Converter – перетворює сигнал із середовища Simulink у фізичну величину для електричної схеми;
- Solver Configuration – забезпечує належне розрахування динамічних процесів у моделі на основі фізичних зв'язків;
- Scope – осцилограф.

Таким чином, побудована модель RC-ланцюга дозволяє дослідити ефективність фільтрації імпульсів грозового характеру, що впливають на вторинну обмотку трансформатора, і оцінити здатність схеми обмежувати перенапругу в електричній мережі.

2.3 Параметризація моделей пристроїв обмеження перенапруг

2.3.1 Розрядник

Модель розрядника у середовищі MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) реалізується за допомогою спеціалізованого блоку Surge Arrester (Implement metal-oxide surge arrester), який імітує нелінійний опір із сильно вираженою експоненційною вольт-амперною характеристикою. Такий підхід дозволяє точно врахувати поведінку метал-оксидного (ZnO) розрядника при впливі імпульсної перенапруги.

В основі моделі лежить математичне представлення характеристики одного стовпа ZnO-дисків у вигляді трьох послідовних експоненційних відрізків:

$$\frac{V}{V_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{\alpha_i}, i = 1, 2, 3,$$

де V – миттєва напруга, В;

I – струм, А;

V_{ref} – опорна напруга, В;

I_{ref} – опорний струм, А;

k_i, α_i – параметри i -го сегмента характеристики [19].

Було використано такі параметри для моделювання, які наближено відповідають характеристикам розрядника для мережі з рівнем напруги 110 кВ:

- Reference voltage V_{ref} (опорна напруга) = 200 000 В (200 кВ) — напруга, при якій відбувається активна провідність;
- Number of columns (кількість колонок) = 2 — еквівалентна кількість ZnO-стовпів, які підвищують здатність до поглинання енергії;
- Reference current per column I_{ref} (опорний струм на колонку) = 500 А;
- Segment 1 characteristics (характеристики сегмента 1) $[k_1, \alpha_1] = [0.955, 50]$;
- Segment 2 characteristics (характеристики сегмента 2) $[k_2, \alpha_2] = [1.0, 25]$;
- Segment 3 characteristics (характеристики сегмента 3) $[k_3, \alpha_3] = [0.9915, 16.5]$;

- Measurements (вимірювання) = Branch voltage and current (напруга та струм у гілці) — для подальшого аналізу процесів у місці встановлення розрядника [19].

Такі параметри забезпечують точну апроксимацію ВАХ ZnO-розрядника в широкому діапазоні струмів — від стану очікування до режиму короткочасного струму перенапруги.

Таким чином, обрана параметризація відповідає реальним характеристикам обмежувачів перенапруг класу 110 кВ та дозволяє дослідити вплив імпульсів перенапруги на захищене обладнання. Модель дозволяє адекватно відобразити фазу провідності та поглинання енергії розрядником під час надмірних імпульсів напруги.

2.3.2 ZnO-варистор

Цинкоксидні варистори (ZnO) широко застосовуються як обмежувачі перенапруг завдяки своїм високим нелінійним електричним характеристикам, які забезпечують різке зниження опору при досягненні критичної напруги. Для їх моделювання в MATLAB/Simulink необхідно врахувати вольт-амперну характеристику, енергетичні параметри та динаміку реакції на імпульсні перенапруги.

Для моделювання нелінійної дії цинкоксидного варистора (ZnO) в середовищі MATLAB/Simulink використовувався спеціалізований блок Varistor з бібліотеки Simscape > Electrical > Specialized Power Systems > Passive Devices. У моделі застосовано Power-law параметризацію, яка дозволяє точно відтворити три основні області роботи варистора за вольт-амперною характеристикою:

- область струмів витоку (Leakage region) – варистор має дуже високий опір, і струм зростає повільно при підвищенні напруги;
- нормальна область провідності (Normal region) – опір експоненційно зменшується при зростанні напруги;

- область прориву (Upturn region) – опір дуже малий, струм різко зростає, наближаючись до короткого замикання [20].

Відповідно, ці області роботи варистора для Power-Law Parameterization зображені на рис. 2.12 [20].

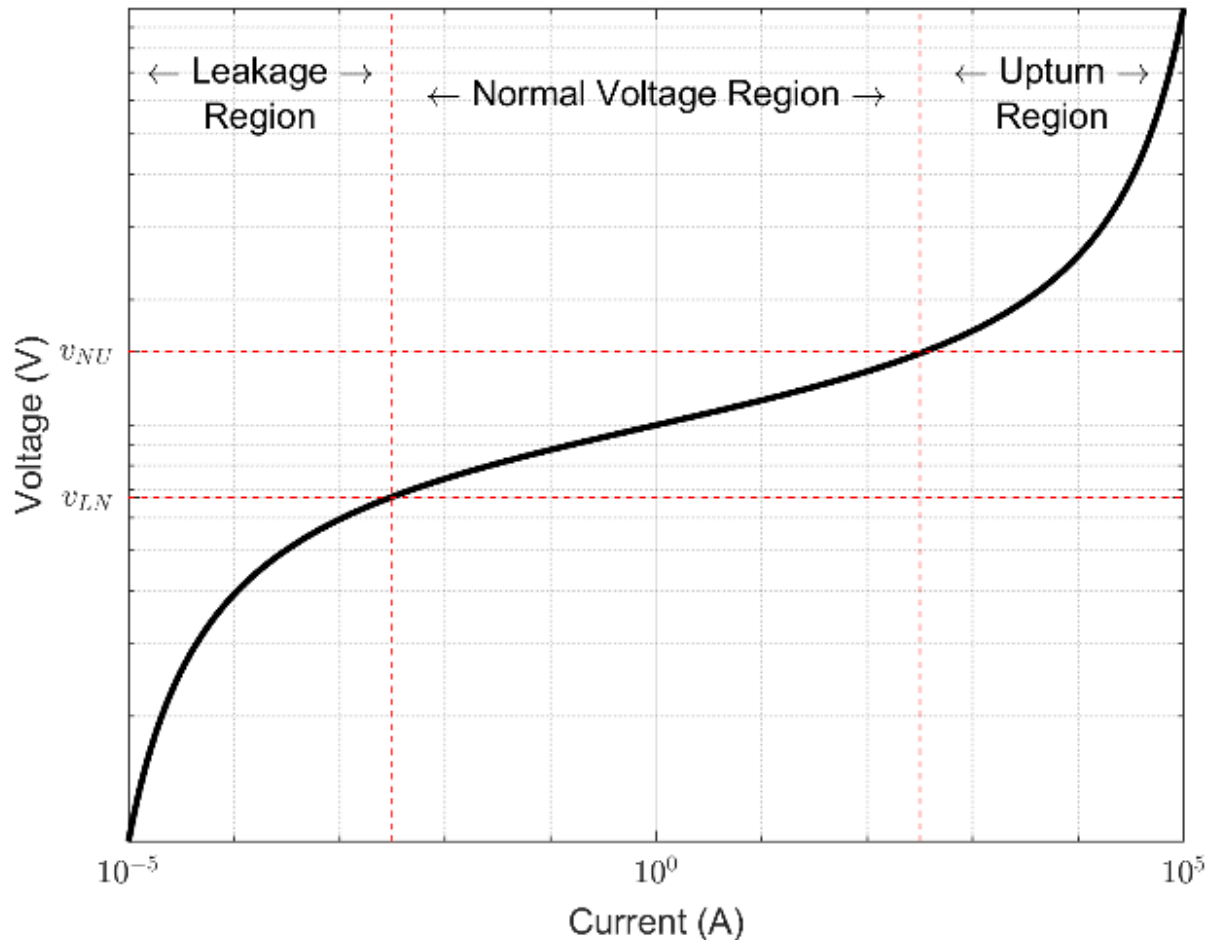


Рисунок 2.12 – Області роботи варистора з Power-Law параметризацією

Ця модель є придатною для аналізу реакції на широкі діапазони перенапруг, що виникають у мережах класу 110 кВ.

Використані параметри для моделі варистора:

- Parameterization (параметризація): Power-law (степеневий закон);
- Leakage to normal voltage transition (перехід витoku до нормальної напруги): 130 кВ;

- Normal to upturn voltage transition (перехід від нормальної напруги до підвищеної): 300 кВ;
- Leakage-mode resistance (опір в режимі витоку): $3 \cdot 10^8$ Ом;
- Normal-mode power-law exponent (експонента степеневого закону в нормальному режимі): 45;
- Upturn-mode resistance (опір в режимі підвищеної напруги): 0.07 Ом;
- Terminal resistance (опір клем): 100 мкОм;
- Capacitance (ємність): 4.4 нФ [20].

Математична модель вольт-амперної характеристики:

Згідно з документацією MathWorks, струм варистора $i_{varistor}$ у різних областях роботи варистора визначається так:

$$i_{varistor} = \begin{cases} \frac{u_{varistor}}{R_L}, & |u_{varistor}| < u_{LN} \\ k \cdot (u_{varistor})^\alpha + c_1, & u_{LN} \leq |u_{varistor}| \leq u_{NU} \\ \frac{u_{varistor}}{R_U} + c_2, & |u_{varistor}| > u_{NU} \end{cases}$$

де $u_{varistor}$ – напруга на варисторі, В;

α – показник степеневої залежності в нормальній області;

R_L, R_U – опори відповідно в режимах витоку та прориву, Ом;

k, c_1, c_2 – коефіцієнти, що забезпечують безперервність струму між областями, обчислюються автоматично на основі введених параметрів [20].

Уся модель побудована відповідно до фізичних доменів Simscape, що забезпечує коректне моделювання динаміки й теплових ефектів у подальшому.

2.3.3 RC-ланцюг

RC-ланцюги (резистивно-ємнісні обмежувачі перенапруг) використовуються здебільшого для згладжування фронтів імпульсних перенапруг та зменшення їх крутизни. Такі обмежувачі ефективні як додаткові захисні елементи для трансформаторів, вимикачів та іншого обладнання у високовольтних мережах, зокрема 110 кВ.

Для моделювання RC-ланцюга як пристрою обмеження перенапруги використано паралельне з'єднання резистора та конденсатора. Така конфігурація забезпечує поглинання імпульсної енергії та зменшення крутизни фронту перенапруг.

Параметри елементів підібрані таким чином:

- опір: 1 МОм – високий опір дозволяє уникнути суттєвого навантаження на мережу у нормальному режимі роботи, водночас забезпечуючи поступове розсіювання накопиченого заряду після імпульсу перенапруги;
- ємність: 1 нФ – вибрана як достатня для накопичення заряду при імпульсах тривалістю до кількох мікросекунд, характерних для грозових або комутаційних перенапруг.

Таке значення ємності забезпечує швидку реакцію на різкі зміни напруги, а високе значення опору запобігає появі суттєвих струмів у сталому режимі. Комбінація цих параметрів дозволяє ефективно працювати в режимі високочастотного фільтрування та демпфування імпульсів без суттєвого впливу на нормальну роботу мережі 110 кВ.

2.4 Аналіз вимог до захисту елементів мережі

У системах електропостачання класу напруги 110 кВ захист від перенапруг є критичним для забезпечення надійної роботи силових трансформаторів, вимикачів, вимірювальних трансформаторів, кабельних з'єднань і пристроїв автоматики. Недостатнє або несвоєчасне обмеження перенапруг може призвести до пробою ізоляції, пошкодження обладнання або аварій.

Вимоги до ефективного захисту визначаються такими ключовими критеріями:

- обмеження амплітуди перенапруги – напруга на клеммах обладнання не повинна перевищувати допустимий рівень ізоляції, що для 110 кВ системи становить не більше ніж 450 кВ при грозових імпульсах;

- швидкодія – захисний пристрій повинен реагувати на імпульси з фронтом менше 1 мкс, що особливо важливо при грозових перенапругах;
- енергетична витривалість – пристрій має здатність поглинати імпульсну енергію до десятків кілоджоулів без деградації;
- стійкість до багаторазових імпульсів – насамперед для ZnO-варисторів, що повинні витримувати десятки тисяч циклів без погіршення характеристик;
- відповідність стандартам координації ізоляції, зокрема IEC 60071, який визначає допустимі ізоляційні рівні для заданого класу напруги [21].

У ході виконання роботи були змодельовані три типи пристроїв, кожен з яких має свої переваги та обмеження у відповідності до вищенаведених вимог:

- метал-оксидний (ZnO) розрядник забезпечує ефективне та швидке зниження імпульсної перенапруги до заданого рівня і є основним елементом для захисту від грозових імпульсів;
- ZnO-варистор, змодельований із Power-law параметризацією, демонструє високу точність у обмеженні напруги на проміжку між 130 кВ та 300 кВ, і водночас володіє високою швидкодією та стійкістю до повторних імпульсів, що дозволяє його використовувати як ключовий елемент захисту трансформаторів;
- RC-ланцюг (із $R = 1 \text{ МОм}$ та $C = 1 \text{ нФ}$) виконує допоміжну функцію – зменшення крутизни фронту імпульсної напруги, згладжування викидів напруги та захист від високочастотних перенапруг, які можуть спричиняти внутрішні перенапруги в обмотках трансформаторів.

Захисні пристрої доцільно розміщувати в точках підключення до трансформаторів та на вводах підстанції, відповідно до схем координації ізоляції. У межах цієї роботи захист застосовується до трансформаторів 110/10 кВ, також може застосовуватись до таких типових елементів мережі, як повітряна або кабельна лінія та комутаційне обладнання (вакуумні та елегазові вимикачі).

Таким чином, проведене моделювання дозволяє оцінити ефективність окремих пристроїв обмеження перенапруг при реальних умовах навантаження та

визначити доцільні параметри їх використання в системі 110 кВ.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розроблено електричні моделі пристроїв обмеження перенапруг, що призначені для захисту елементів високовольтної електричної мережі класу напруги 110 кВ.

На основі аналізу типових перенапруг та методів їх компенсації було обґрунтовано вибір трьох основних типів пристроїв для моделювання:

- металоксидного розрядника (ZnO-обмежувача), що забезпечує відведення імпульсної енергії до землі та має високу швидкодію завдяки сильно нелінійній ВАХ;
- ZnO-варистора, що забезпечує ефективне обмеження напруги завдяки сильно нелінійній ВАХ;
- RC-ланцюга, що дозволяє згладити фронт імпульсу і зменшити його вплив на чутливе електрообладнання.

У середовищі MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) сформовано відповідні електричні схеми кожного типу пристрою. Для кожної моделі було підібрано типові або рекомендовані параметри на основі літературних джерел, стандартів та характеристик практичних зразків обладнання. Всі моделі реалізовано з урахуванням фізичних доменів, що дозволяє здійснювати адекватне моделювання взаємодії з електричною мережею.

Параметризація моделей охоплювала:

- для розрядника – налаштування референтної напруги, струму, кількості колон та сегментної нелінійності ВАХ;
- для ZnO-варистора – використання Power-law моделі з визначенням коефіцієнтів n та k для реалістичного відображення характеристики пристрою;
- для RC-ланцюга – вибір номіналів резистора та конденсатора (1 МОм та 1 нФ відповідно), що забезпечують оптимальне згладжування фронтів перенапруг.

Крім того, у пункті 2.4 виконано аналіз вимог до захисту основних елементів мережі – трансформаторів, вимикачів та повітряних ліній – що дозволило обґрунтувати необхідність застосування кількох типів обмежувачів одночасно для досягнення комплексного захисту.

Таким чином, сформовано повноцінну основу для подальшого моделювання роботи пристроїв обмеження перенапруг у складі електричної мережі та оцінки їх ефективності в умовах впливу атмосферної перенапруги.

З МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ

3.1 Аналіз роботи моделей пристроїв

У процесі моделювання дії пристроїв обмеження перенапруг для кожного з варіантів схем було побудовано графіки зміни напруги на первинній та вторинній обмотках трансформатора. У всіх трьох моделях – із розрядником, варистором та RC-ланцюгом – характер отриманих сигналів напруги є однаковим. Зокрема, чітко простежується дія грозового імпульсу, який накладається на синусоїдальну робочу напругу, що є типовою для нормального режиму роботи високовольтної електричної мережі.

Оскільки графіки напруги на трансформаторі є ідентичними для всіх трьох варіантів моделювання, їх подальший аналіз у розрізі кожного типу пристрою не несе додаткової інформативності. Тому для оцінки ефективності роботи моделей пристроїв обмеження перенапруг доцільно зосередитись на аналізі графіків струмів, що протікають через відповідні захисні елементи. Саме струмові характеристики дають змогу оцінити момент спрацьовування пристрою, інтенсивність реакції на перенапругу та ступінь її обмеження.

Загальний графік напруги на обмотках трансформатора зображений на рис. 3.1.

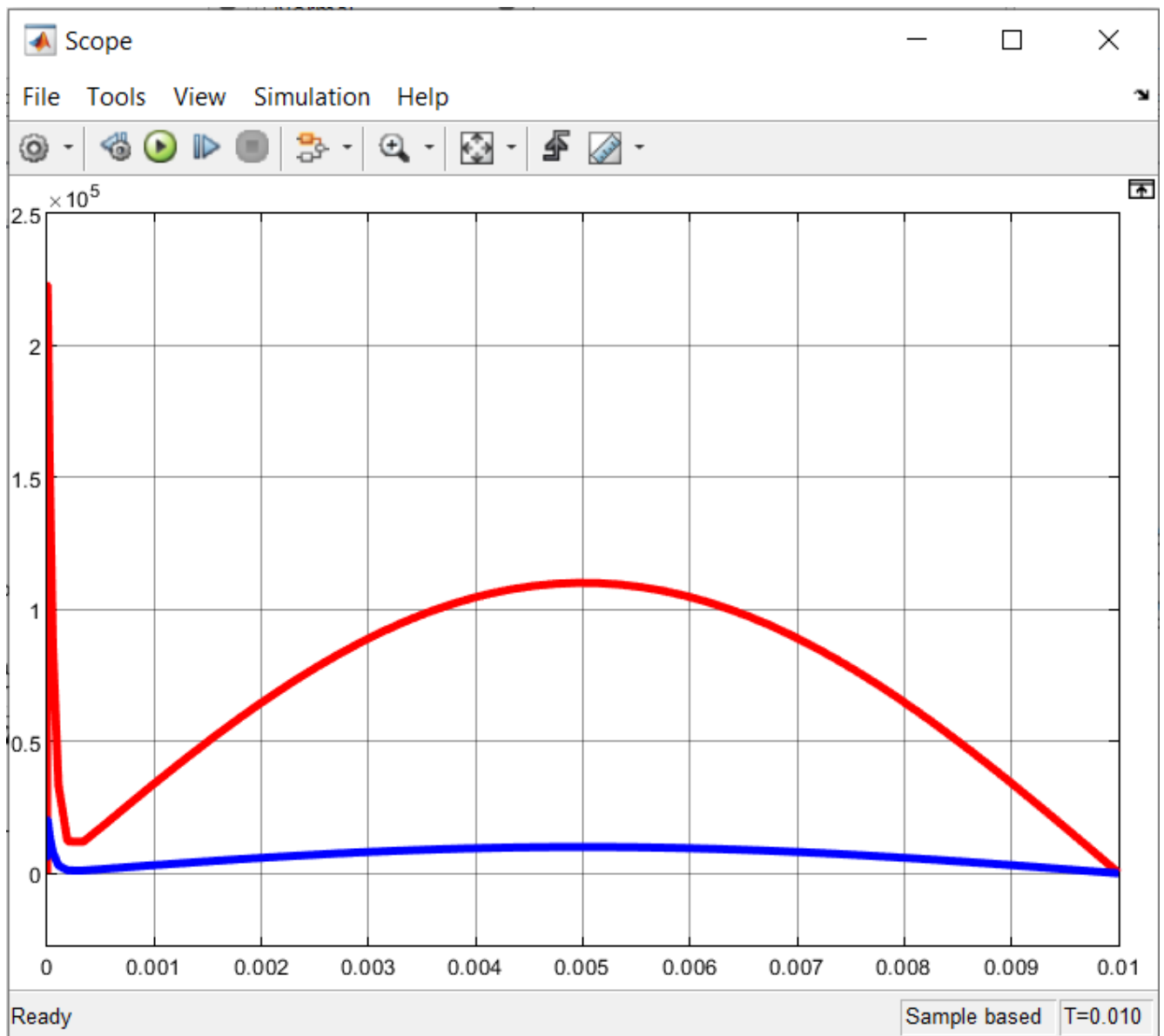


Рисунок 3.1 – Графік напруг на трансформаторі: червоним – на первинній обмотці, синім – на вторинній

У наступних підпунктах буде представлено аналіз струмових графіків для кожного з типів пристроїв – розрядника, ZnO-варистора та RC-ланцюга.

3.1.1 Розрядник

На основі моделювання можна проаналізувати характер роботи розрядника під час дії грозового імпульсу. На рис. 3.2, що відображає струм, який проходить через розрядник, спостерігається чіткий імпульсний пік струму з амплітудою трохи більше 7000 А, після чого струм стрімко зменшується та прямує до нуля. Така

форма струму свідчить про типову реакцію розрядника на надлишкову напругу: після досягнення певного порогового значення напруги пристрій переходить у провідний стан, пропускаючи через себе струм і тим самим забезпечуючи шлях для відведення енергії імпульсу в землю.

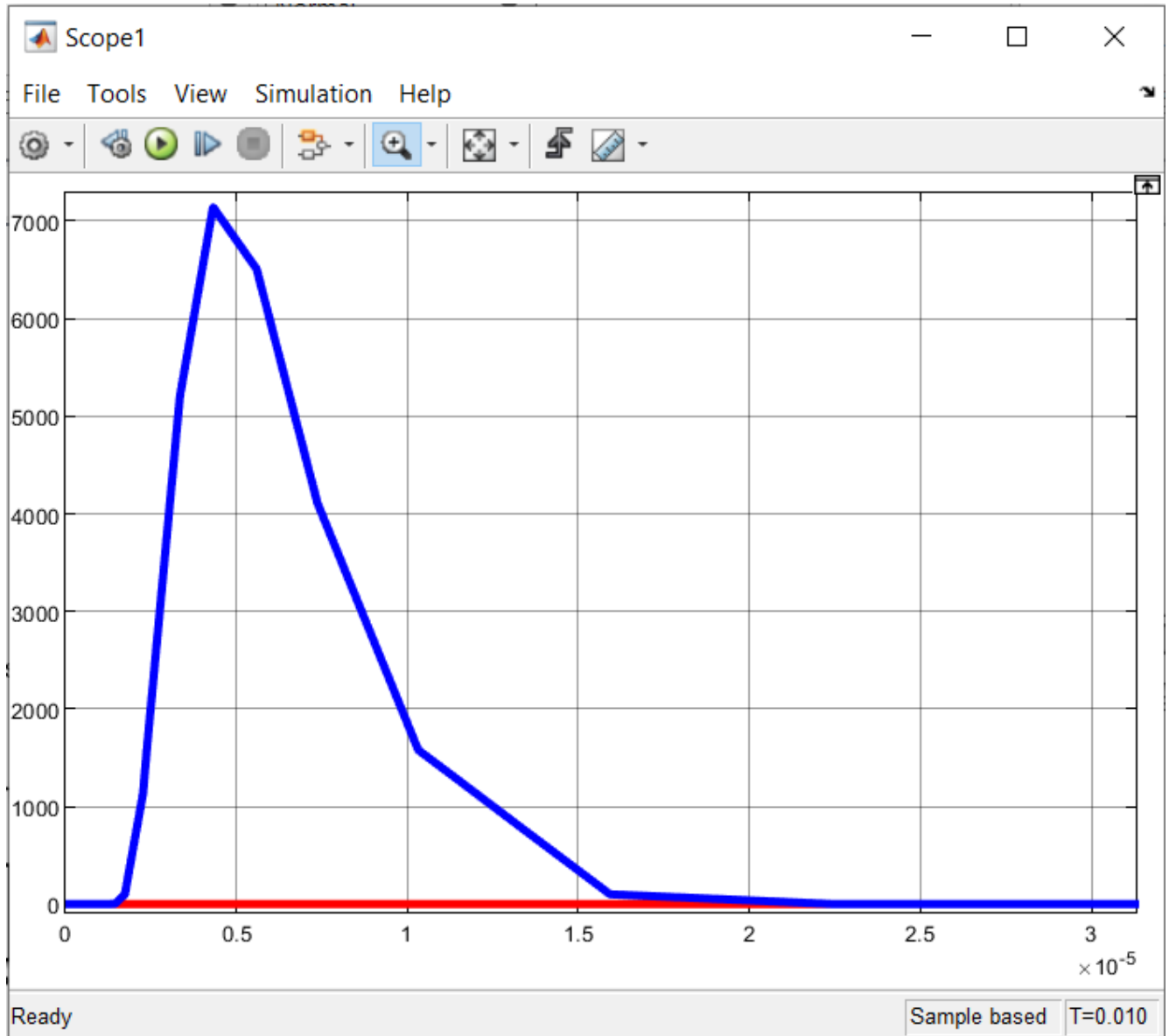


Рисунок 3.2 – Графік струмів: синім – струм, що проходить крізь розрядник, червоний – через первинну обмотку трансформатора

Одночасно із цим, струм у первинній обмотці трансформатора залишається на дуже низькому рівні, що свідчить про ефективну роботу захисного пристрою – розрядник «перехоплює» грозовий імпульс до того, як він потрапляє на трансформатор. Це дозволяє уникнути небезпечного перенапруження в обмотках

та пошкодження ізоляції обладнання.

Таким чином, розрядник демонструє правильну та очікувану поведінку: у разі виникнення атмосферної перенапруги він відкривається, відводить надлишковий струм у землю, після чого повертається в непровідний стан. Це підтверджує його ефективність як елементу системи захисту високовольтного електрообладнання.

3.1.2 ZnO-варистор

У результаті моделювання роботи ZnO-варистора було проаналізовано графік струмів через варистор та через первинну обмотку трансформатора. Згідно з отриманими результатами, максимальне значення струму, що протікає через варистор у момент дії грозового імпульсу, становить трохи більше 80 А. Після досягнення пікової величини струм поступово спадає до нульового значення, що відповідає завершенню впливу перенапруги.

Струм через первинну обмотку трансформатора при цьому залишається відносно невеликим – на рівні 8–9 А, тобто значна частина енергії імпульсу була ефективно відведена через варистор. Такий характер поведінки є типовим для металоксидного варистора (ZnO), що працює за нелінійною вольт-амперною характеристикою: при перевищенні порогової напруги опір різко знижується, дозволяючи пропустити струм і тим самим обмежити амплітуду перенапруги на захищеному об'єкті.

На рис. 3.3 зображено результат моделювання роботи ZnO-варистора – графіки струмів.

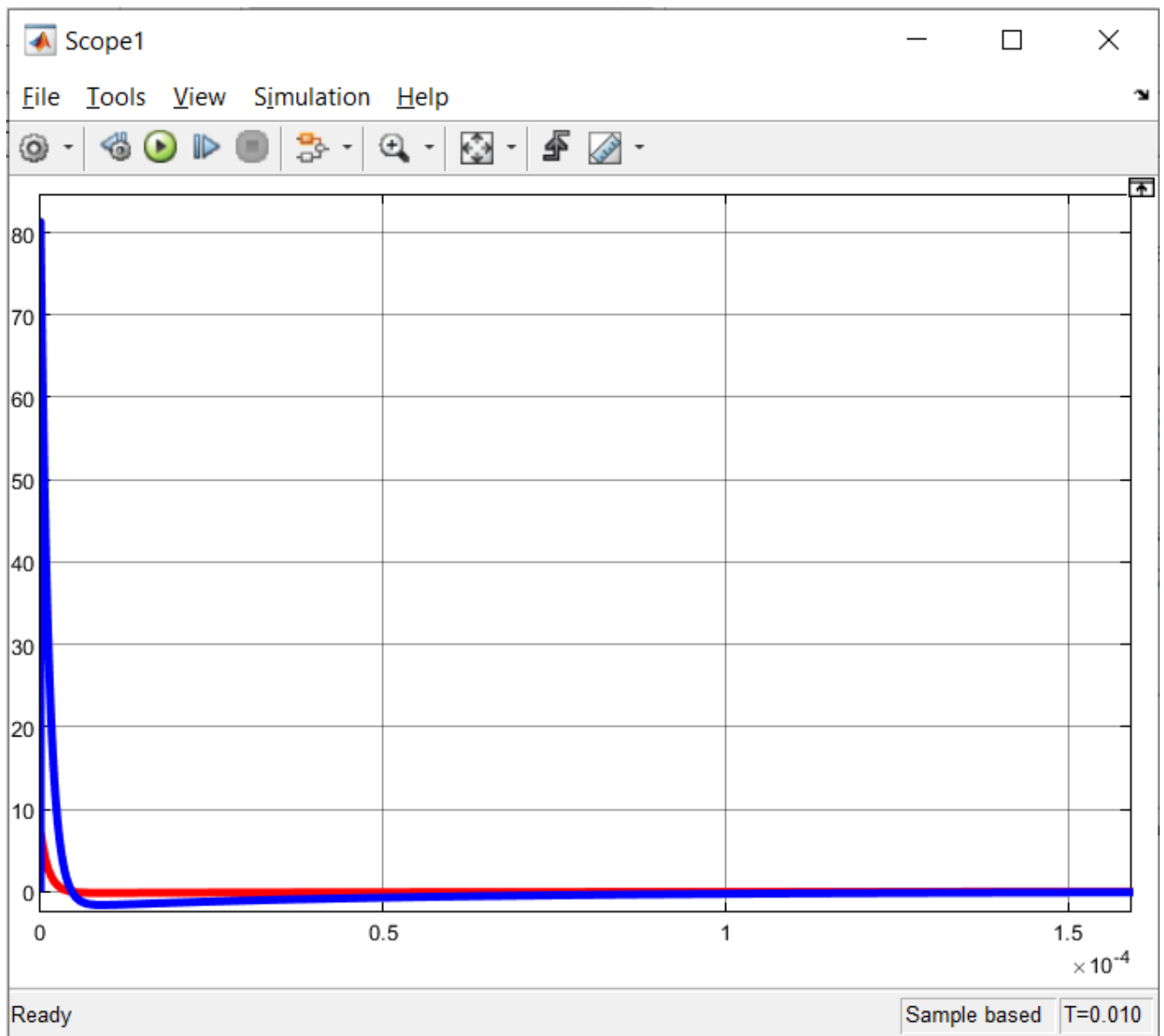


Рисунок 3.3 – Графік струмів: синім – струм, що проходить крізь варистор, червоним – через первинну обмотку трансформатора

Таким чином, результати моделювання підтверджують правильність роботи моделі варистора та його ефективність у ролі пристрою обмеження перенапруг, спрямованого на захист електрообладнання від грозових імпульсів.

3.1.3 RC-ланцюг

У моделі RC-ланцюга використано паралельне з'єднання резистора та конденсатора, підключене до вторинної обмотки ідеального трансформатора. За результатами моделювання спостерігається типовий імпульсний режим роботи

елементів схеми у відповідь на дію грозового імпульсу. Результат моделювання, а саме графік струмів, зображено на рис. 3.4.

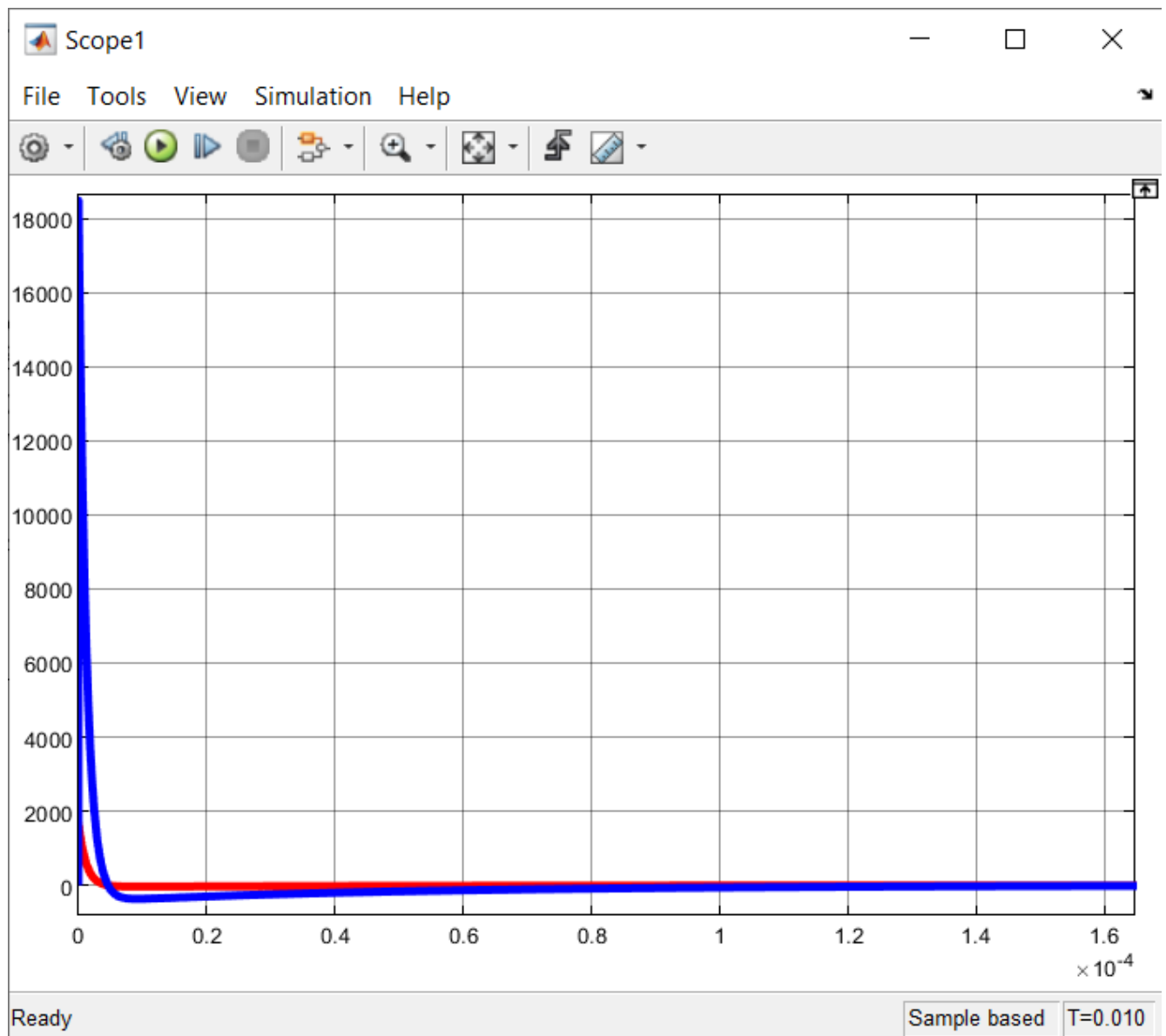


Рисунок 3.4 – Графік струмів: синім – струм, що проходить крізь RC-коло , червоним – через первинну обмотку трансформатора

На графіку струму, крізь RC-ланцюг видно, що його амплітудне значення перевищує 18 000 А. Це пояснюється характером дії конденсатора, який у початковий момент подачі імпульсної напруги поводить себе як коротке замикання, пропускаючи через себе значну частину імпульсного струму. У міру заряджання конденсатора, струм спадає до нуля – така форма струму є типовою для імпульсного процесу в паралельному RC-колі.

Струм, що проходить через первинну обмотку трансформатора, також має імпульсний характер, однак його амплітуда суттєво менша – близько 1800 А. Це свідчить про те, що значна частина енергії грозового імпульсу була розсіяна у РС-ланцюзі, зменшуючи навантаження на об'єкт захисту.

Таким чином, отримані результати підтверджують працездатність РС-ланцюга як пристрою обмеження перенапруг. Його здатність ефективно відводити імпульсний струм дозволяє зменшити рівень напруги, прикладеної до захищеного обладнання, що є важливою умовою для підвищення надійності електричної мережі.

3.2 Порівняльна оцінка ефективності пристроїв обмеження перенапруг

На основі отриманих результатів моделювання для трьох типів пристроїв обмеження перенапруг – розрядника, ZnO-варистора та RC-ланцюга – можна здійснити порівняльну оцінку їх ефективності з точки зору здатності відводити імпульсні струми та забезпечувати захист елементів електричної мережі від грозових перенапруг.

Найбільш ефективним з точки зору швидкої реакції та здатності пропускати великий імпульсний струм виявився розрядник. Пікове значення струму крізь нього перевищувало 7000 А, що свідчить про здатність пристрою ефективно відводити надлишкову енергію грозового імпульсу у землю. При цьому струм через первинну обмотку трансформатора залишався на низькому рівні, що вказує на надійний захист об'єкта.

ZnO-варистор показав помірну здатність до обмеження перенапруг – пікове значення струму через нього становило трохи більше 80 А. Це набагато менше порівняно з іншими моделями, однак варистори відзначаються точністю спрацьовування при досягненні певної напруги та довговічністю. Через первинну обмотку трансформатора проходив струм в межах 8–9 А, що також свідчить про зниження впливу перенапруги на обладнання.

Натомість RC-ланцюг виявився найпотужнішим за пропускну здатністю імпульсного струму – через паралельне RC-коло проходив струм понад 18 000 А. Це свідчить про значну здатність поглинати енергію перенапруги. Проте струм через первинну обмотку трансформатора був також вищим – приблизно 1800 А, що може вказувати на менш ефективну ізоляцію об'єкта від впливу імпульсу.

Отже, з погляду максимальної ефективності захисту від атмосферних перенапруг у високовольтних мережах, найбільш доцільним є використання розрядників, оскільки вони забезпечують потужне відведення струму з мінімальним впливом на захищене обладнання. ZnO-варистори можуть бути використані як додатковий засіб для тонкого обмеження перенапруг, особливо в середньо- та низьковольтних мережах. RC-ланцюги мають найбільшу

енергоємність, але не завжди гарантують достатній рівень ізоляції для чутливого обладнання.

У практиці часто застосовують комбінований підхід, поєднуючи розрядники та варистори, що дозволяє ефективно обмежувати як високі грозові імпульси, так і менш потужні комутаційні перенапруги.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було проведено моделювання роботи трьох типів пристроїв обмеження перенапруг – розрядника, ZnO-варистора та RC-ланцюга – в умовах дії атмосферної перенапруги грозового типу. В якості об'єкта захисту використовувався трансформатор, до якого підключались відповідні моделі захисних пристроїв.

У процесі моделювання встановлено, що характер напруги на обмотках трансформатора однаковий в усіх трьох випадках, що дозволило зосередити увагу на аналізі струмів, які проходять через обмежувачі перенапруг і трансформатор.

Аналіз результатів показав:

- розрядник забезпечує ефективне відведення імпульсного струму значної амплітуди (понад 7000 А), водночас ізолюючи трансформатор від надмірного струмового навантаження;
- ZnO-варистор реагує на перенапругу з меншим імпульсним струмом (понад 80 А), однак демонструє стабільну та прогнозовану поведінку з плавним обмеженням напруги;
- RC-ланцюг відводить найбільший струм (понад 18 000 А), але струм у трансформаторі у цьому випадку також вищий, що може вказувати на меншу ефективність захисту чутливого обладнання.

Порівняльна оцінка свідчить, що найкращі результати при захисті від грозових імпульсів у високовольтних мережах демонструє розрядник. ZnO-варистори можуть застосовуватись як додаткові елементи захисту, а RC-ланцюги – для поглинання надлишкової енергії в менш чутливих до перенапруг системах.

Отримані результати підтверджують доцільність використання різних

пристроїв обмеження перенапруг залежно від конкретних умов експлуатації та вимог до надійності захисту.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуто актуальну проблему захисту елементів високовольтних електричних мереж від перенапруг, що виникають внаслідок атмосферних та комутаційних впливів. Проведене дослідження дозволило зробити такі висновки:

- здійснено аналіз природи виникнення перенапруг у мережах напругою 110 кВ, класифіковано їх за походженням, формою та тривалістю, а також охарактеризовано основні методи обмеження перенапруг у сучасній електроенергетиці;
- обґрунтовано доцільність застосування пристроїв обмеження перенапруг, таких як нелінійні розрядники, ZnO-варистори та RC-ланцюги, як засобів захисту високовольтного обладнання;
- розроблено моделі елементів електричної мережі, зокрема трансформатора з номінальною напругою 110/10 кВ, а також джерела грозової перенапруги у вигляді уніфікованого грозового імпульсу напруги;
- змодельовано три типи пристроїв обмеження перенапруг: розрядник (Surge Arrester), варистор (Varistor) та RC-ланцюг, з урахуванням їх нелінійних електричних характеристик та схем підключення;
- проведено моделювання динаміки струмів у ланцюзі трансформатор–обмежувач перенапруг для кожного варіанта пристрою за умов грозового впливу;
- встановлено, що всі розглянуті пристрої здатні ефективно відводити імпульсні струми від об'єкта захисту. Найвищу здатність до обмеження показав RC-ланцюг, проте розрядник забезпечив найменший вплив на первинну обмотку трансформатора, що є критичним для запобігання пошкодженню;
- на основі аналізу отриманих результатів визначено доцільність застосування розрядників як найефективніших пристроїв для захисту трансформаторів від грозових імпульсів, особливо у високовольтних мережах;
- результати роботи можуть бути використані при проєктуванні систем

захисту електричних підстанцій, а також як основа для подальших досліджень щодо вдосконалення методів захисту від перенапруг.

Отже, поставлена мета роботи досягнута, задачі вирішено, а розроблені моделі мають практичну цінність для забезпечення надійної експлуатації високовольтного електрообладнання.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Overvoltage. Wikipedia : the free encyclopedia. URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Overvoltage>
2. Акімов О.І., Нерубацька А.В. Захист повітряних ліній від грозових перенапруг. ІКСЗТ, 2013.
URL: <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2090561>
3. Моргун Ю.О., Баланюк В.М., Михаличко Б.М. Спеціальні питання техніки високих напруг. Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2015.
URL: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/files/15_3.pdf
4. Техніка високих напруг: навчальний посібник / за ред. О.І. Акімова. Київ: НТУУ «КПІ», 2012.
5. Захист споруд та електричних систем від впливів блискавки: навчальний посібник / за ред. О.І. Акімова. Київ: НТУУ «КПІ», 2014.
6. Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах: навчальний посібник / В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ , 2010. – 145 с.
URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Sobchuk_2011_145.pdf
7. Блискавковідводи сталеві багатогранні. ProLite Service. URL:
<https://proliteservice.com.ua/ua/p1452155655-molnieotvody-stalnye-mnogogrannye.html>
8. Lightning rod. Wikipedia : the free encyclopedia.
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lightning_rod
9. Surge protector. Wikipedia : the free encyclopedia.
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Surge_protector
10. Обмежувачі перенапруг нелінійні ОПНп-6/6,9 УХЛ1. АксіомПлюс. URL:
<https://axiomplus.com.ua/ua/opn/product-145881/>
11. Обмежувач перенапруг ОПС1-В 3R. Volt-Shop. URL: <https://volt-shop.com.ua/uk/product/obmezhuвач-perenaprug-ops1-v-3r/>

12. Розрядник. Wikipedia : the free encyclopedia.
URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Розрядник>
13. Varistor. Wikipedia : the free encyclopedia.
URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Varistor>
14. RC circuit. Wikipedia : the free encyclopedia.
URL: https://en.wikipedia.org/wiki/RC_circuit
15. Implement two- or three-winding linear transformer – Simulink. The MathWorks, Inc. URL:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/lineartransformer.html>
16. Ideal transformer in electrical systems – MATLAB. The MathWorks, Inc.
URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/idealtransformer.html>
17. Implement controlled voltage source – Simulink. The MathWorks, Inc. URL:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/controlledvoltageource.html>
18. Controlled Voltage Source - MATLAB - MathWorks. The MathWorks, Inc.
URL: <https://www.mathworks.com/help/simscape/ref/controlledvoltageource.html>
19. Implement metal-oxide surge arrester – Simulink. The MathWorks, Inc. URL:
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/surgearrester.html>
20. Varistor - Voltage-dependent resistor - MATLAB. The MathWorks, Inc.
URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/varistor.html>
21. IS/IEC 60071-1 (2006): Insulation Co-ordination, Part 1. URL:
<https://law.resource.org/pub/in/bis/S05/is.iec.60071.1.2006.pdf>