

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Меленівського Владислава Володимировича

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ПРИ **ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ ПІДПРИЄМСТВ**

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Цивенкова Наталія Михайлівна
(прізвище, ім'я, по батькові)
К.Т.Н., доц.
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Меленівський В. В. Удосконалення системи захисту від перенапруг при електропостачанні підприємств. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Житомирський національний агроекологічний університет, Житомир, 2020.

В результаті аналітичних досліджень обладнання для захисту систем електропостачання від імпульсних перенапруг встановлено аналітичні залежності ризику відмов обладнання від параметрів імпульсів. Запропоновано технічне удосконалення обмежуючого пристрою, проведено імітаційне моделювання його роботи.

Ключові слова: перенапруга, надійність, захист, розрядник, кратність перенапруг.

SUMMARY

Melenivsky V.V. "**Improvement of the system of protection against overvoltages at power supply of the enterprises**" – Manuscript.

Master's work for Master "Master" specialty 141 " Electric power, electrical engineering and electromechanics ". Zhytomyr National Agroecological University, Zhytomyr, 2020.

As a result of analytical researches of the equipment for protection of power supply systems against impulse overvoltages analytical dependences of risk of failures of the equipment on parameters of impulses are established. The technical improvement of the limiting device is offered, the simulation modeling of its work is carried out.

Key words: overvoltage, reliability, protection, arrester, multiplicity of overvoltages.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ.....	6
РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВ ОБЛАДНАННЯ	14
РОЗДІЛ 3. АПАРАТНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ	22
РОЗДІЛ 4. ВИПРОБУВАННЯ РОБОТИ МОДИФІКОВАНОГО ОБМЕЖУВАЧА	28
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

ВСТУП

Актуальність теми. Електричні мережі та системи електропостачання є складними багатокомпонентними технологічними комплексами, орієнтованими на транспортування, розподіл і споживання електричної енергії. Реалізація цих основних функціональних призначень проводиться при проектуванні і експлуатації на основі впорядкованої і цілеспрямованої взаємодії окремих елементів і частин систем в рамках вирішення різноманітних виробничих завдань. Погіршення якості електроенергії здійснює прямий негативний вплив на економіку підприємств, що оснащені сучасним технологічним обладнанням. Однак навіть у разі раптової короткочасної перерви електропостачання порушується технологічний процес. При цьому втрати підприємств досить суттєві, оскільки повторний запуск виробництва вимагає серйозних ремонтно-відновлювальних робіт.

Тому підвищення стійкості до перенапруг, розробка методів, сучасних технічних засобів захисту від перенапруг та обґрунтування заходів запобігання відмов в системах електропостачання є актуальною проблемою.

Об'єктом дослідження є системи електропостачання 110/35/10 кВ.

Предметом дослідження є аварійність системи «трансформатор – кабель живлення – споживач» внаслідок впливу імпульсних перенапруг.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи математичного аналізу, основи теорії нечіткої логіки. Математичне та імітаційне моделювання проводилося в програмному середовищі Matlab Simulink.

Мета роботи полягає в підвищенні надійності систем електропостачання 110/35/10 кВ при імпульсних перенапругах в системі «трансформатор – кабель живлення – споживач».

Завдання досліджень

1. Провести аналіз існуючого обладнання, призначеного для захисту від перенапруг та визначити пріоритетні напрямки.

2. Провести аналіз аварійності систем електропостачання підприємств та внаслідок впливу імпульсних перенапруг.
3. Скласти математичну модель, яка дозволяє з певною точністю визначити втрати підприємств від нестационарних параметрів мережі.
4. Запропонувати шляхи удосконалення діючих технічних засобів обмеження перенапруг та дати їм техніко-економічну оцінку.

Перелік публікацій за темою досліджень:

1. Цивенкова Н. М., Меленівський В. В. Удосконалення системи захисту від перенапруг при електропостачанні підприємств. *Наукові читання – 2020*: зб. матеріалів доп. учасн. наук.-практ. конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики, 5-6 березня 2020 р. – Житомир: ПНУ, 2019. – С. 74–78.

2. Меленівський В. В. Климчук М. О. Аспекти захисту від внутрішніх перенапруг в мережах електропостачання. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: зб. матеріалів доп. учасн. XXI Міжнар. наук. конф. ім. П. М. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2020. – С. 349-350.

3.

Практичне значення отриманих результатів:

В результаті аналізу аварійності систем електропостачання підприємств та наслідків впливу імпульсних перенапруг визначено пріоритетні напрямки технічного забезпечення процесів захисту від перенапруг в мережах до 110 кВ. Отримана математична модель дозволяє з певною точністю визначити втрати підприємств від нестационарних параметрів мережі. Запропоновано шляхи удосконалення діючих технічних засобів обмеження перенапруг та надано їм техніко-економічну оцінку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ

Разом з широким переліком факторів, причинами короточасних перерв електропостачання споживачів, є імпульси перенапруг. Основними причинами імпульсів перенапруг є удари блискавки на об'єкти і спуроди (зовнішні перенапруги), а також комутації різного устаткування (внутрішні) [3, 8, 9, 10]. Відомо, що такі імпульси мають тривалість від декількох мікросекунд до декількох мілісекунд, тобто не перевищують тривалість одного-двох періодів основної частоти. За величиною вони можуть досягати 6-7 значень номінальної фазної напруги (рис. 1.1) [2, 4].



Рисунок 1.1 – Типові зовнішні та внутрішні перенапруги в мережах електропостачання

Досвід експлуатації показав, що основна кількість аварійного виходу з ладу електрообладнання пов'язана з пробоем ізоляції внаслідок впливу комутаційних перенапруг (КП) та природнім старінням ізоляції. Зокрема, понад

40% однофазних замикань на землю в системах електропостачання 6-10 кВ підприємств виникає саме через КП [4].

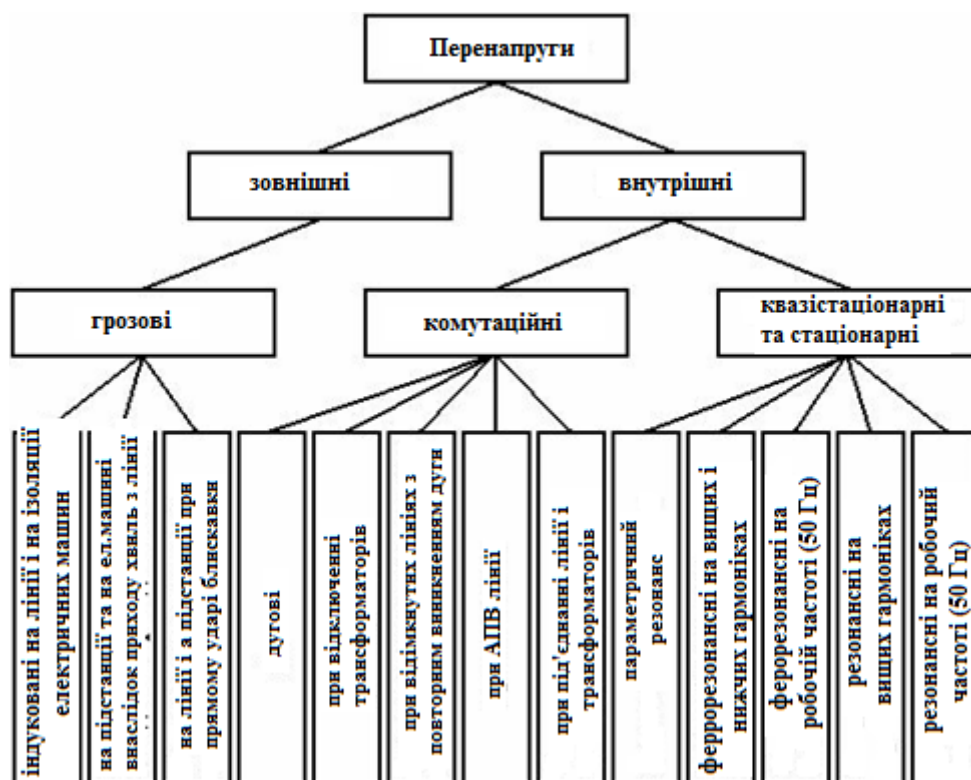


Рисунок 1.2 – Класифікація перенапруг в системах електропостачання

Відомо, що захисні пристрої виконують дві функції:

- приєднання кола, що підлягає захисту, до заземлювача при впливі перенапруги (безпосередня захисна функція);
- відключення кола, що підлягає захисту, від заземлення при закінченні дії перенапруги, що часто пов'язано з відключенням виникаючого короткого замикання в колі, що захищається.

Тривалий час розповсюдженим засобом захисту від перенапруг були вентиляльні розрядники, які виконують свою функцію завдяки наявності іскрових проміжків (рис. 1.3). Під час перенапруги з'єднаний з ними нелінійний резистор знижує значення струму до величини, яку можна погасити іскровими проміжками. Проте недостатня нелінійність вольт-секундної характеристики таких пристроїв не дозволяє використовувати їх в повному обсязі [2, 4, 11].

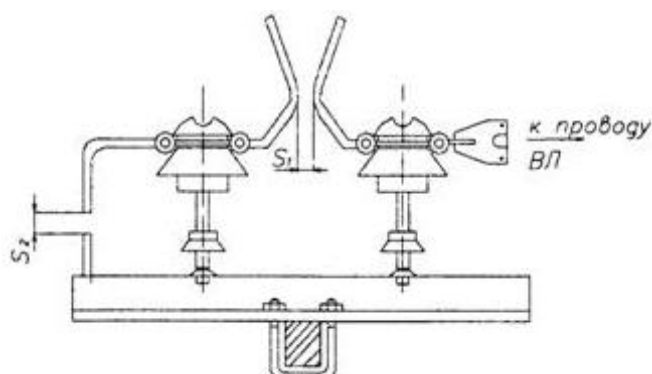


Рисунок 1.3 – Роговий іскровий проміжок для захисту підстанцій та ПЛ

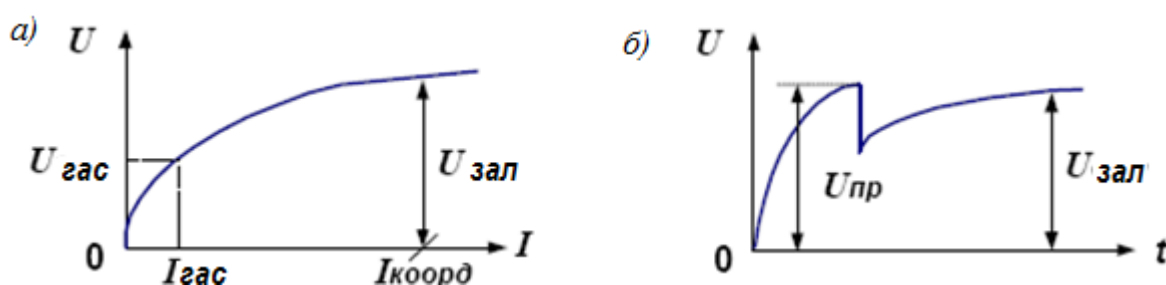


Рисунок 1.4 – Вольтамперна характеристика резистора вентильного розрядника (а) і напруга на вентильному розряднику при його спрацьовуванні (б)

Принцип роботи сучасних нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) також заснований на нелінійності вольтамперних характеристик, тільки властивість ця більш виражена, ніж у випадку з розрядником. ОПН дозволяють обмежувати комутаційні перенапруги на рівні $(1,65 \dots 1,8) U\phi$, а грозові – на рівні $(2,2 \dots 2,4) U\phi$ [4, 17]. Нелінійність вольтамперних характеристик обумовлена використанням варисторів на основі оксиду цинку. Опір таких варисторів різко спадає при виникненні перенапруги в мережі. При завершенні сплеску напруги варистори повертаються в звичайний режим, їх опір зростає, а протікаючий струм падає до десятків мікроампер, що фактично перетворює ОПН в ізолятор. Більш виражена нелінійність характеристик металоксидних

варисторів дозволяє не використовувати в конструкції ОПН іскрові проміжки [23, 24].

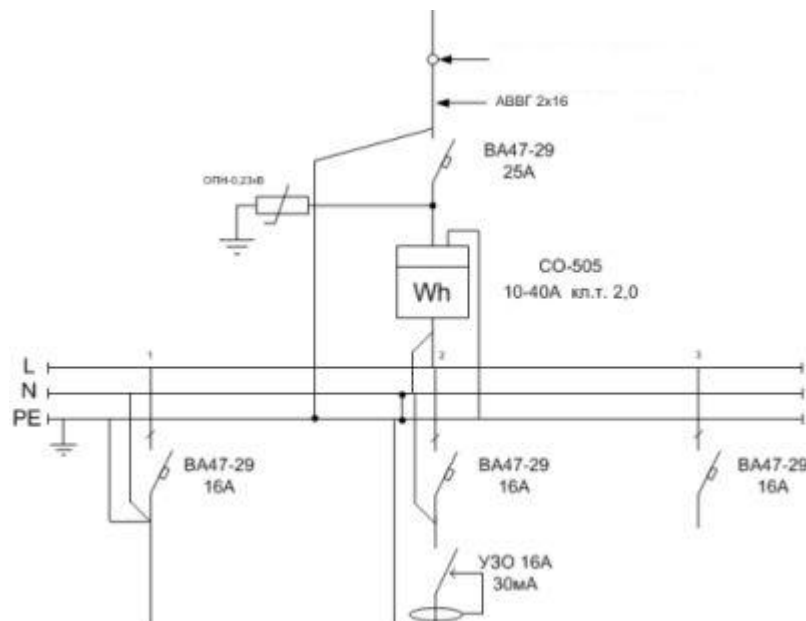


Рисунок 1.5 – Приклад схеми підключення ОПН

Сучасні ОПН забезпечують більш надійний захист, більш стійкі до зовнішніх забруднень, мають кращі масогабаритні характеристики. Ці та інші переваги сприяють широкому їх впровадженню. Модернізація обладнання в системах електропостачання передбачає їх експлуатацію з більш низькими кратностями перенапруг, які забезпечують тільки ОПН.

Конструкції ОПН, пропоновані нині виробниками дуже різноманітні, їх розрізняють за такими ознаками [17, 18, 24]:

- 1) за типом ізоляції (фарфор або полімер);
- 2) за конструктивним виконанням (одна або кілька колонок);
- 3) за величиною робочої напруги;
- 4) за місцем установки обмежувача.

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

До плюсів обмежувачів з порцелянкової ізоляцією відносять:

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

Недоліки ОПН з порцеляновим покриттям:

- недостатнє забезпечення герметичності вузла кріплення фланця до порцелянкової ізоляційної покришки і збереження властивостей гумових ущільнювачів в процесі тривалої експлуатації;
- висока вибухонебезпечність (порцелянові оскільки під час вибуху розлітаються в різні боки з величезною швидкістю);
- маса і габарити (обмежувачі в полімерній покришці в 2-3 рази легше ОПН з порцелянкової ізоляцією);
- гірші порівняно з ОПНп теплові характеристики [17].

Полімерні ОПН складаються з колонки варисторів, ув'язнених в високоміцний полімерний корпус з високомолекулярного каучуку. Простір між склопластиковою трубою і колонкою резисторів заповнюється низькомолекулярним каучуком, а сама труба має розрахункову кількість отворів для забезпечення вибухобезпеки конструкції при проходженні струмів короткого замикання. На даний момент полімерні ОПН перевершили за масштабами використання та виробництва порцелянові ОПН.

Переваги полімерних ОПН:

- висока гідрофобність;
- більш висока вибухонебезпечність, ніж у порцелянових ОПН;
- механічна стійкість;
- мала маса;
- кращі, ніж у ОПН в порцеляновій покришці, електричні і розрядні характеристики;
- простота монтажу і транспортування, а також стійкість до ударних і вібраційних дій;

- здатність працювати в умовах природних і промислових забруднень.

До недоліків полімерних обмежувачів відносяться:

- вплив сезонних коливань температури навколишнього середовища (внутрішній простір має значно більший коефіцієнт теплового розширення від матеріалу покриття, що може привести до деформації ребер покриття і зниження електричної міцності зовнішньої ізоляції);
- неправильний розрахунок механічного навантаження може привести до розтріскування варисторів обмежувача [17].

Одноколонкові ОПН конструктивно складаються з однієї колонки варисторів. Вони випускаються з довжиною шляху витоку зовнішньої ізоляції, яка, (згідно ГОСТ 9920), відповідає другий, третій і четвертій ступеням забруднення. Існують одноколонкові ОПН на всі класи напруги, при цьому максимально використовується об'єм корпусу апарату, що також значно знижує масу в порівнянні з багатоколонковими ОПН і істотно підвищує надійність роботи [17].

Багатоколонкові ОПН являють собою кілька блоків (модулів), які утворюються з певного числа колонок, з'єднаних або послідовно, або паралельно між собою. Використовуються при великих класах напруги мережі, ОПН складають з двох або трьох частин (модулів). Така конструкція істотно підвищує надійність роботи ОПН при зволоженні і забрудненні поверхні апарату [17].

Переважає більшість ОПН на даний час виготовляється із застосуванням кремнійорганічної ізоляції. Однак деякі виробники пропонують ОПН з варисторами, безпосередньо залитими в шар кремнійорганічної гуми. Зокрема така конструкція забезпечує відсутність повітряних включень, надійну герметизацію, менші габарити і меншу масу в порівнянні з обмежувачами, встановленими всередині полімерного ізолятора [17].

Проте, інші типи ізоляції також залишаються затребуваними. Зокрема, фірма «АББ» має в своїй номенклатурі різні типи ОПН – з фарфоровою

ізоляцією, з варисторами всередині пустотілого полімерного ізолятора і з нанесенням полімерної ізоляції безпосередньо на блоки варистора.

Вибір типу конструкції і технології виготовлення обмежувачів залежить від класу напруги, необхідного рівня якості, собівартості і інших параметрів, причому всі варіанти в тій чи іншій мірі мають певні переваги і недоліки. За способом закріплення варисторів в оболонці можна умовно виділити два типи конструкції ОПН – «залежну» і «незалежну».

«Залежна» конструкція виконується, наприклад, шляхом нанесення на стержень варисторів обплетення з склопластикової сітки (без зазору між варисторами і оболонкою) з подальшим нанесенням рідкої гуми безпосередньо на обплітку і варистори.

«Незалежна» конструкція передбачає розміщення колонки варисторів всередині цільної склопластикової труби, покритої ізолюючим шаром, при цьому між колонкою варисторів і внутрішньою поверхнею труби є повітряний зазор, а скидання тиску відбувається через мембранні вузли у фланцях. Склопластикові труба забезпечує жорсткість і міцність апарату, а наявність зазору не допускає передачі механічних впливів від оболонки до варистора. За сукупністю цих чинників, «незалежна» конструкція ОПН представляється більш надійною.

Порівнюючи переваги і недоліки рідких, в'язких і твердих гум для ізоляції ОПН, можна стверджувати, що кращу механічну міцність ребер, а також більший кут їх нахилу дозволяють забезпечувати тверді сорти гуми. Переваги ж рідких гум лежать в площині технології виготовлення і економіки.

Вибір характеристик ОПН, в першу чергу, визначається характеристиками (випробувальними напругами) обладнання, яке підлягає захисту, що дозволяє в першому наближенні визначити залишкові напруги на обмежувачі при впливі імпульсів струму комутаційної і грозової хвилі. Також, характеристики ОПН визначаються кратністю і частотою виникнення комутаційних перенапруг, кратністю і тривалістю квазістаціонарних перенапруг, величиною грозових перенапруг. Надалі визначаються параметри

ОПН – найбільша робоча напруга, номінальний розрядний струм, енергоємність ОПН, вольт-часові характеристики і т.д.

Раніше під час проектування енергетичних об'єктів проводився весь комплекс досліджень перенапруг, який дозволяв визначити необхідні характеристики ОПН. На жаль, наразі такі дослідження не завжди проводяться в повному обсязі, що може призводити до небажаних наслідків при експлуатації ОПН. Наприклад, в мережах 110 кВ не завжди враховується режим роботи заземлюваної нейтралі в аварійних ситуаціях роботи мережі. Тому виробники такого обладнання повинні самі проводити весь комплекс досліджень перенапруг в енергетичних об'єктах, необхідний для визначення характеристик ОПН при заміні вентиляльних розрядників і вибору точок їх установки [24, 25, 28].

Методи діагностування вентиляльних розрядників [11]:

1. Вимірювання опору. (R)
2. Вимірювання струмів провідності ($I_{пр}$) у розрядників з шунтуючими опорами, які повинні відповідати нормативним значенням.
3. Вимірювання пробивної напруги ($U_{пр}$) промислової частоти 50 Гц.
4. Тепловізійне обстеження (за допомогою приладів інфрачервоної техніки з високою роздільною здатністю по температурі (не нижче $0,5^{\circ}C$)).

Висновок по розділу

Найбільш перспективним є обмеження внутрішніх перенапруг за допомогою нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН), що мають більш виражену нелінійність вольтамперної характеристики.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНКА РИЗИКУ ВІДМОВ ОБЛАДНАННЯ

Однією з умов ефективного функціонування підприємств є підвищення надійності електрообладнання. Тому важливим є завдання оцінки ризику відмови обладнання, яка повинна проводитися за допомогою алгоритму, що забезпечує автоматичне налаштування відповідно до інтегрованої інформації та в оцінці ризику відмови в результаті впливу внутрішніх та зовнішніх перенапруг. Оцінка ризику відмови обладнання є складовою частиною його технічного обслуговування і ремонту, що дозволяє раціонально організувати його експлуатацію [14].

Наразі існує безліч методик визначення ризику [1, 14, 16, 19]. Найбільш часто поняття ризику зустрічається в поєднанні з такими термінами, як невизначеність, ймовірність, подія, збиток. Недостатньо вважати ризиком (R) ймовірність (P) відмов системи електропостачання підприємств, в результаті якого виникають збитки (Q) для основного виробництва. Показники ймовірності і збитків повинні бути багатофакторними. При розрахунку імовірнісної складової ризику необхідно враховувати статистичні дані про напрацювання і детерміністичні дані про експлуатацію, для оцінки ризику раціонально оцінювати перелік техніко-економічних показників: продуктивність, значимість об'єкта в технологічному процесі, складність відновлення після відмови та ін.

Оскільки однозначно визначити весь перелік факторів ризику відмов через перенапруги – задача складна, яка пов'язана з великим переліком зовнішніх впливів, індивідуальними технічними характеристиками обладнання, з технологічними особливостями монтажу та експлуатації, терміном експлуатації обладнання та ін., для формалізації цієї задачі необхідно використовувати ті математичні методи, які дозволять з певною точністю урахувати вище перелічені фактори. Використання теорії нечітких множин [13,

20, 27] дозволить найбільш повно описати функцію ризику відмови через перенапруги, врахувати нечіткі дані про форму кривої, кратності, повторюваності перенапруг та інш.

Ризик відмови через перенапруги визначається функцією:

$$R = f(K, PP, F), \quad (2.1)$$

де K – кратність перенапруги, що визначається як відношення максимального значення перенапруги до амплітуди робочої напруги на ізоляції електрообладнання споживача;

PP – повторюваність, яка визначається очікуваним числом випадків виникнення перенапруг за розглянутий проміжок часу, наприклад, на рік;

F – форма кривої перенапруг, що визначається довжиною фронту, довжиною полуспада, тривалістю і кількістю імпульсів.

Вихідними даними при моделюванні ризику відмови через перенапруги є множина можливих значень:

- середній параметр потоку відмов обладнання споживачів x_1 , 1/рік (терми: велике, середнє, мале);
- кратність перенапруг x_2 , відн.од. (терми: сильна, помірна, слабка);
- повторюваність x_3 , відн.од. (терми: дуже часта, часта, нечаста);
- форма кривої перенапруг x_4 , відн.од. (терми: дуже небезпечна, небезпечна, безпечна).

Характеристики перенапруг виражені відносно номінальних величин.

Функції належності обраних лінгвістичних змінних x_1, x_2, x_3, x_4 графічно представлені на рис. 2.1.

Для формалізації якісних висловлювань використані трикутні і трапецієподібні функції належності. Нечіткі множини в діапазонах можливих значень середнього параметра потоку відмов обладнання споживачів, кратності, повторюваності і форми кривої перенапруг записуються наступним чином:

$$A_j^{LZ_i} = \left\{ D_i, \mu_{A_j^{B_i}}(D_i) \right\}, \quad (2.2)$$

де LZ_i – лінгвістична змінна;

j – номер терма LZ_i ;

D_i – значення параметра LZ_i ;

$\mu_{A_j LZ_i}$ – функція належності значення D_i до нечіткої множині $A_j^{LZ_i}$;

A^{LZ_i} – множина можливих значень D_i .

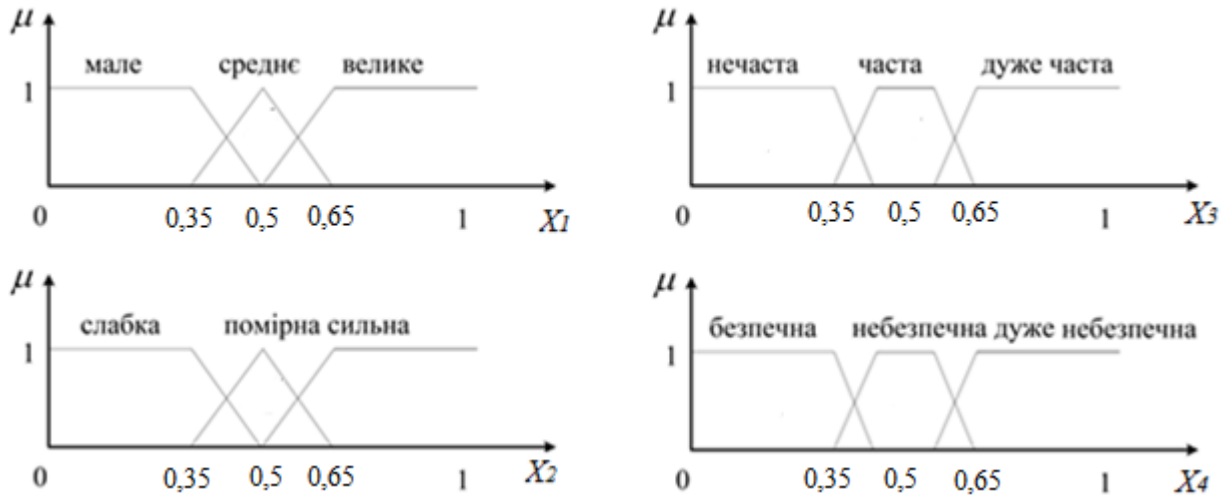


Рисунок 2.1 – Опис лінгвістичних змінних

Значення функції належності знаходяться в інтервалі від 0 до 1 і інтерпретуються як ступінь належності аргументу до відповідних множин.

Для визначення динаміки ризику відмови через перенапруги (R), відповідно до значення середнього параметра потоку відмов обладнання споживачів, кратності, повторюваності і форми кривої перенапруг, введений універсум – ризик втрат на виробництві при відмові обладнання споживачів, що містить нечіткі множини:

$$B_N = \{DR, \mu_{BN}(DR) : DR \in Y\}, \quad (2.3)$$

де DR – значення ризику втрат у виробництві основного виду продукції на окремому підприємстві (цеху);

$\mu_{BN}(DR)$ – функція належності значення ризику втрат при виробництві основного виду продукції до нечіткої множині BN ;

Y – множина значень ризику втрат у виробництві.

На рис. 2.2 нечіткі множини значень ризику втрат описані трикутною і трапецієподібними функціями належності.

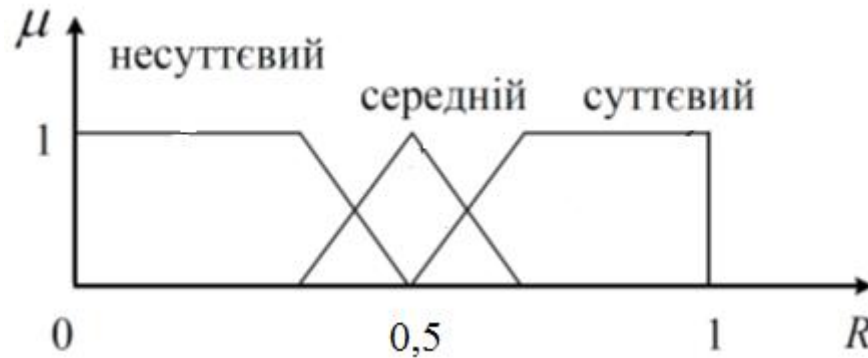


Рисунок 2.2 – Опис нечітких множин ризиків втрат при виробництві основного виду продукції підприємства по причині перенапружень в електричній мережі

Для розв'язання поставленої задачі можна використати один із типових методів, зокрема алгоритм Мамдані [13, 20, 27]. У загальному вигляді деякі правила нечіткого висновку для визначення ризику відмов мають вигляд, наведений в додатку А.

Композиція підвисновків в нечітких правилах дає значення величини ризику втрат R при відмові від перенапруги. На етапі дефазифікації отриманого значення ризику визначають його вагу, що дозволяє прийняти рішення про зміни в системі технічного обслуговування і ремонту електротехнічного обладнання споживачів. Ризик відмови роботи обладнання по причині виникнення перенапруг не є величиною сталою у часі – він залежить від режимів роботи обладнання, деградації ізоляції і та інш.

Схему нечіткого висновку «Ризик відмов при перенапрузі», яка представлена у вигляді логічної функції (2.4) представлено на рис. 2.3.

$$Y = f(X_1, X_2), \quad (2.4)$$

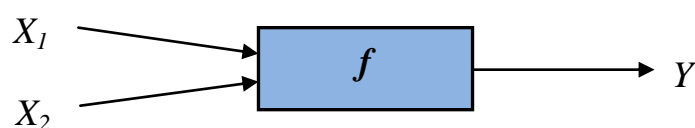


Рисунок 2.3 – Схема нечіткого висновку «Ризик відмов при перенапрузі»

Проте для вирішення задачі формалізації відмови обладнання в результаті дії імпульсів напруг, сформуємо емпіричні знання по даній проблемній області і представимо їх в формі правил (додаток Б).

Наведені евристичні правила використані при побудові бази правил системи нечіткого висновку, що дозволяє реалізувати дану модель нечіткої оцінки ризику відмови електротехнічного обладнання споживачів через перенапруги.

При формуванні бази правил системи нечіткого висновку попередньо визначені вхідні та вихідні лінгвістичні змінні. Для скороченого запису правил використані множини можливих вхідних лінгвістичних змінних: X_1 – перша вхідна лінгвістична змінна з ім'ям «Кратність перенапруги, в.о.»; X_2 – друга вхідна лінгвістична змінна «Швидкість наростання імпульсу, А/с»; Y – вихідна лінгвістична змінна «Імовірність відмови електротехнічного обладнання споживачів, в.о.».

В якості терм-множини вихідної лінгвістичної змінної використовується множина $Y = \{ "0", "0,1", "0,3", "0,5", "0,6", "0,8", "1" \}$. В цьому випадку сформована база правил системи нечіткого висновку буде містити відповідні нечіткі правила (додаток В).

Функції належності термів X_1 , X_2 і Y зображені на рис. 2.4–2.6 відповідно.

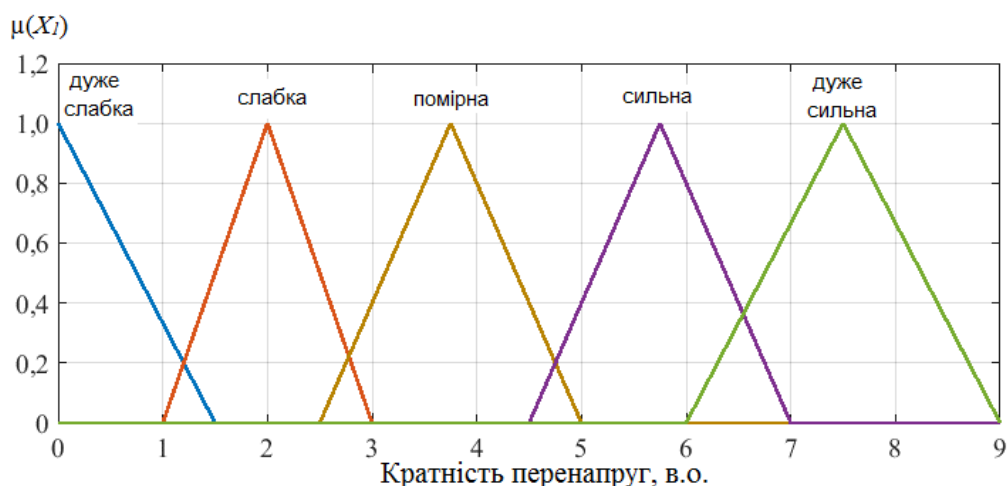


Рисунок 2.4 – Графіки функцій належності для термів вхідної лінгвістичної змінної «Кратність перенапруги, в.о.»

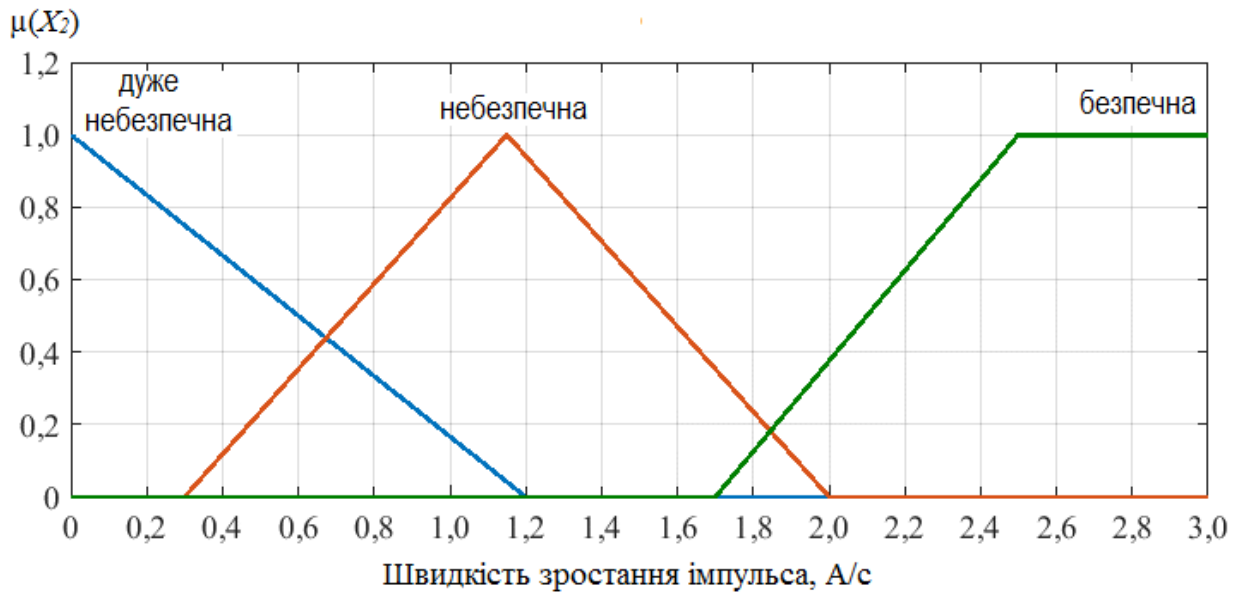


Рисунок 2.5 – Графіки функцій належності для термів вхідної лінгвістичної змінної «Швидкість зростання імпульсу, А/с»

Активацію виконаємо згідно методу min-активації за алгоритмом Мамдані:

$$\mu'(y) = \min \{c_i, \mu(y)\}, \quad (2.5)$$

де $\mu'(y)$ – результат активації функція належності вихідної нечіткої множини;

c_i – ступінь істинності висновків кожного правила;

$\mu(y)$ – функція належності вихідної нечіткої множини.

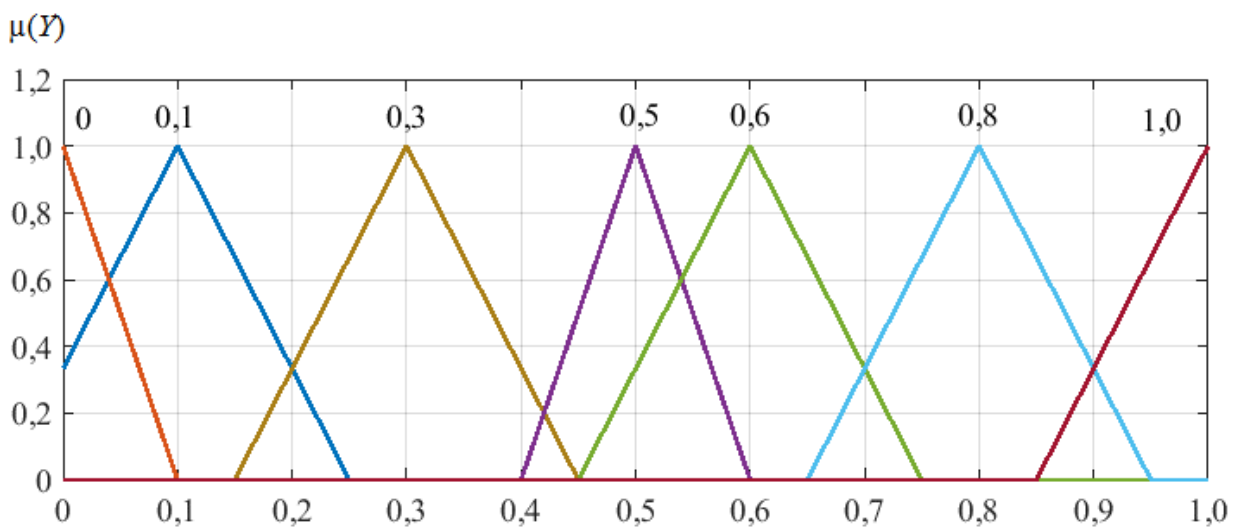


Рисунок 2.6 – Графіки функцій належності для термів вихідної лінгвістичної змінної «Імовірність відмови обладнання, в.о.»

Акумуляцію для одержання функцій належності вихідних змінних проведемо за формулою:

$$\mu_D(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (\forall x \in M_x), \quad (2.6)$$

де $\mu_D(x)$ – функція належності вихідної нечіткої множини D;

$\mu_A(x), \mu_B(x)$ – функція належності вхідних нечітких множин A і B.

Дефазифікацію вихідних лінгвістичних змінних множини $M_x = \{X_1, X_2, \dots, X_s\}$ проведемо за методом центру тяжіння (centroid) [20] за формулою:

$$y = \frac{\int_{Min}^{Max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{Min}^{Max} \mu(x) dx}, \quad (2.7)$$

де y – результат дефазифікації;

x – змінна, яка відповідає вихідній лінгвістичній змінній X;

$\mu(x)$ – функція належності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній X після операції акумуляції;

Min і *Max* – ліва і права точки інтервалу носія нечіткої множини, що розглядається вихідної змінної X.

Для реалізації системи використаємо відповідне програмне забезпечення [7, 13, 26, 27].

Для загального аналізу розробленої нечіткої моделі побудована поверхня нечіткого висновку, представлена на рис. 2.7. Ця залежність є основою для програмування логічного контролера і апаратної реалізації відповідного нечіткого алгоритму прийняття рішень. Встановлення цієї залежності є вирішенням завдання, відомої в класичній теорії управління як завдання синтезу керуючих впливів. Для вирішення поставленого завдання були використані елементи і засоби нечіткої логіки і теорії нечітких множин.

Отримані результати оцінки ризику відмови обладнання через перенапруги дозволяють приймати рішення про технічні заходи, спрямовані на запобігання втрат в системах електростачання: моніторинг динаміки ризику,

модернізація обладнання (використання кабелів з високою діелектричною проникністю), застосування технічних засобів захисту від перенапруг.

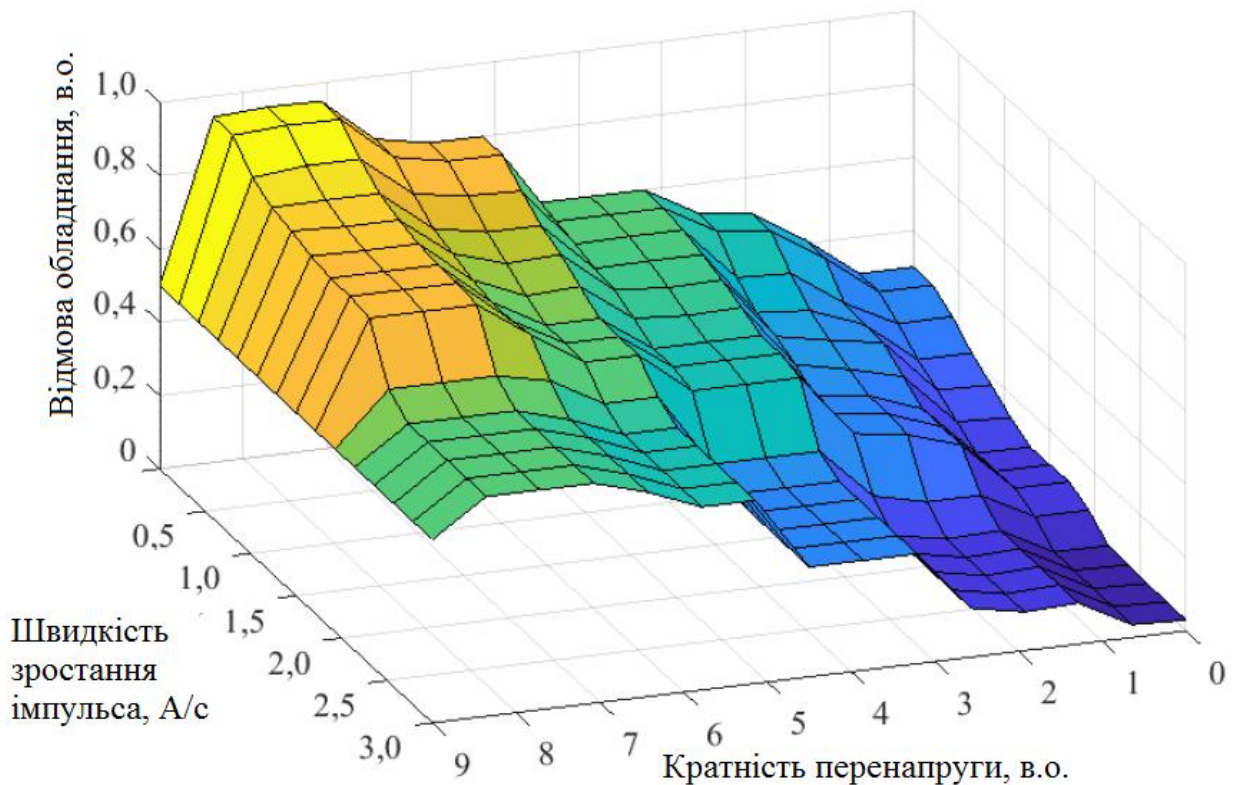


Рисунок 2.7 – Візуалізація поверхні нечіткого висновку для оцінки ризику відмови обладнання при імпульсних перенапругах

Висновок по розділу

Таким чином, запропонований алгоритм оцінки динаміки ризику на основі теорії нечітких множин, який базується на аналізі імовірнісних характеристик надійності, виду і статистики впливів, а також має на увазі облік техніко-економічних показників функціонування об'єктів.

РОЗДІЛ 3

АПАРАТНА МОДЕРНІЗАЦІЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГ

В даний час єдиним варіантом забезпечення захисту ізоляції електрообладнання від внутрішніх перенапруг є використання оксидно-цинкових нелінійних обмежувачів перенапруг, які в силу постійного приєднання до мережі і практичної безінерційності обмежують все комутаційні і дугові перенапруження [20]. В конструкціях нелінійних обмежувачів перенапруг відсутні іскрові проміжки, внаслідок чого варистор апарату в процесі експлуатації постійно піддається впливу напруги в нормальних, аварійних і післяаварійних режимах роботи. Проте, досить успішно використовується конструкція обмежувача перенапруг опорного виконання з іскровими проміжками, що дозволяє одночасно обмежувати як перенапруги щодо землі, так і міжфазні перенапруги. Схема такого захисного апарату, який отримав найменування ОПНІ, наведена на рис. 3.1, а зовнішній вигляд однієї фази обмежувача ОПНІ-500 У1 представлений на рис. 3.2 [1].

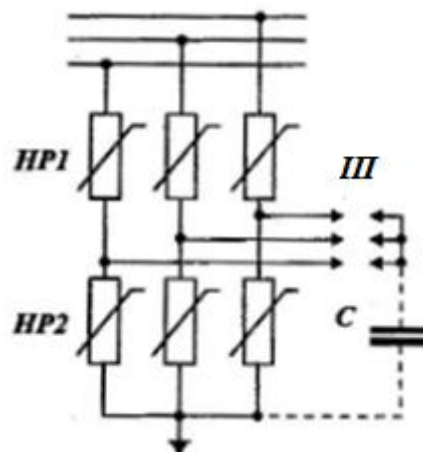


Рис. 3.1 – Схема нелинейного обмежувача перенапруг і його приєднання до електричної мережі

Нелінійний опір кожної фази ОПНІ розділений на дві послідовно з'єднані частини (НР1 і НР2). Всі фази обмежувачів з'єднані між собою іскровими проміжками, включеними зіркою. Середня точка зірки через ємність С з'єднана

з землею. У нормальному експлуатаційному режимі фазна напруга прикладена до послідовно з'єднаних варисторів НР1 і НР2. При дії на апарат хвиль комутаційних перенапруг, які завжди несиметричні, пробиваються іскрові проміжки ІІ, варистори НР2 всіх фаз виявляються з'єднаними паралельно, а варистори НР1 – попарно послідовно між відповідними фазними провідниками. Таким чином, всі варистори трьох фаз обмежувача утворюють чотирипромінну зірку (рис. 3.3) [1, 21, 22, 28].

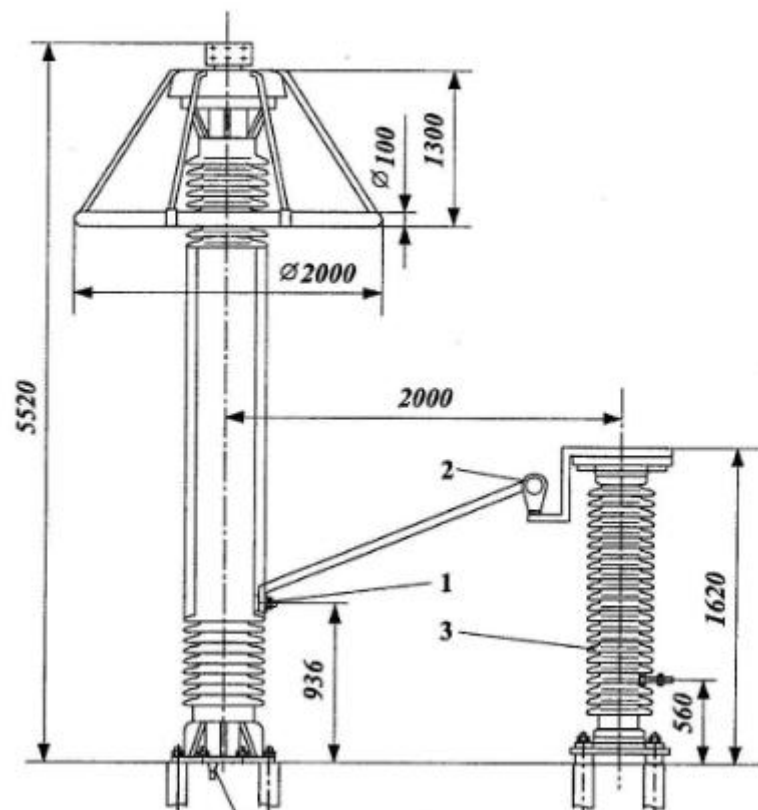


Рисунок 3.2 – Апарат серії ОПНІ в фарфоровому корпусі на напругу 500 кВ

Рівні напруг, що залишаються, можуть регулюватися підбором параметрів НР1 і НР2. Досить імовірно, що розрядна напруга будь-якого ІІ перевищить вплив напруги і його пробоею не відбудеться, тобто обмежувач не увімкнеться в режим обмеження міжфазних перенапруг. Для запобігання таких випадків призначена ємність С, що створює постійний рівень напруги на іскрових проміжках і виключає можливість виникнення подібної ситуації.

Конструктивно апарат ОПНІ-500 У1 відрізняється від обмежувача серії ОПН наявністю відпайки від НР, яка через проміжний ізолюваний вивід 1 (рис.

3.2), що розрахований на напругу 60 кВ, з'єднана з реєстратором спрацьовувань 2 і послідовно з'єднаною з ним іскровою приставкою 3. Іскрова приставка містить набір ІІ, подібних тим, що використовуються в вентильних розрядниках. У приставці є ізолюваний вивід на напругу 35 кВ для підключення до апаратів інших фаз і ємності.

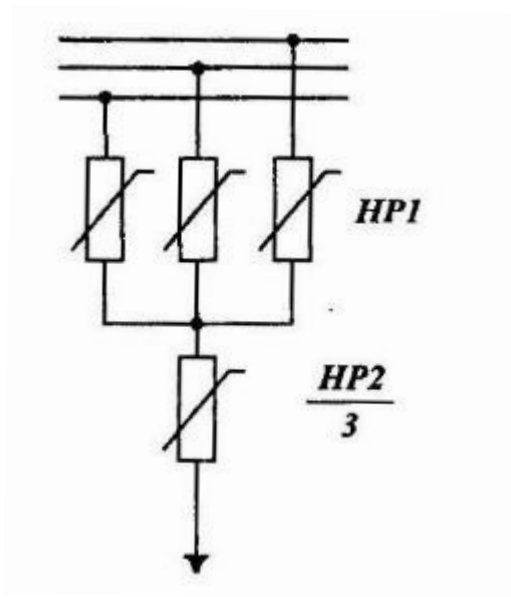


Рисунок 3.3 – Схема нелинійного обмежувача перенапруг і його приєднання до електричної мережі

Запропонована модифікація ОПНІ (рис. 3.4–3.6) дозволить покращити захисні характеристики базового обмежувача за рахунок використання матеріалів з більшими показниками електричної міцності, а модернізація конструкції іскрового проміжку сприятиме більш швидкому гасінню дуги.

Іскровий блок 2 (рис. 3.6) складається з 70 іскрових проміжків (рис. 3.4), кожний з яких попередньо налаштовується на пробивну напругу 3,8-4 кВ. Сумарна пробивна напруга іскрового елемента становить 280 кВ.

В якості елементів, що входять до складу іскрового блоку, використані іскрові проміжки з магнітним гасінням дуги. В якості ізоляційної основи розроблених іскрових проміжків обрано такі матеріали: фторопласт, оргскло і капролон.

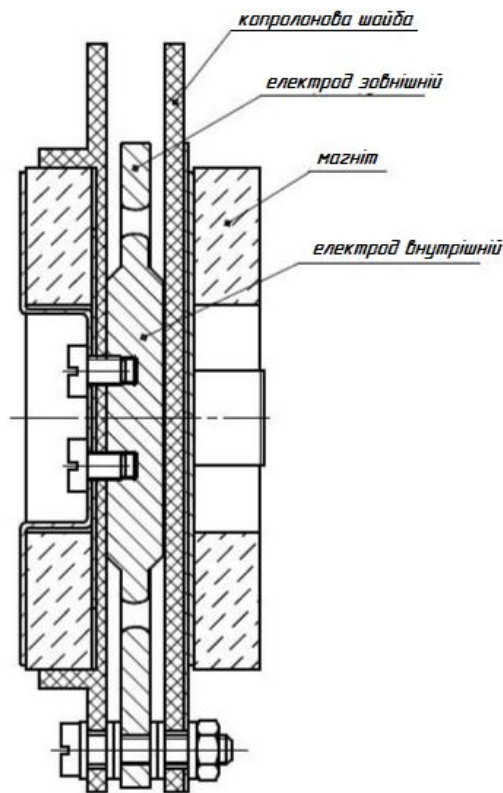


Рисунок 3.4 – Конструкція іскрового проміжка

В якості діелектричної основи іскрового проміжка в елементі вибираємо капролон, оскільки він має значення електричної міцності одне з найбільших серед відомих матеріалів. В якості матеріалу електродів вибираємо латунь з великим вмістом цинку. Наявність кільцевого магніту робить позитивний вплив на швидкість гасіння дуги. При пробі в іскрових проміжках виникає дуга, яка за рахунок дії магнітного поля, що створюється кільцевим магнітом, починає переміщатися між електродами, що забезпечує більш швидке дугогасіння.

Резистивний блок 1 (рис .3.6) запропонованого обмежувача складається з 21 варистора фірми «EPCOS» діаметром 48 мм і висотою 34,5 мм з пропускнуою здатністю 550А. Максимальна висота резистивного блока складає 730 мм. Параметри резистивного елемента: $U_{зал.8/20мс.} = 246кВ$, $U_{найб.роб.} = 77 кВ$.

ОПН-ІІІ-110 це нелінійний обмежувач перенапруг, комбінований з іскровими проміжками, розрахований на клас напруги 110 кВ. Обмежувач є захисним апаратом опорного типу в порцеляновій ізоляції, що складається з

послідовно з'єднаних елементів (рис. 3.5). Обмежувач складається з двох елементів, один з яких є іскровим.

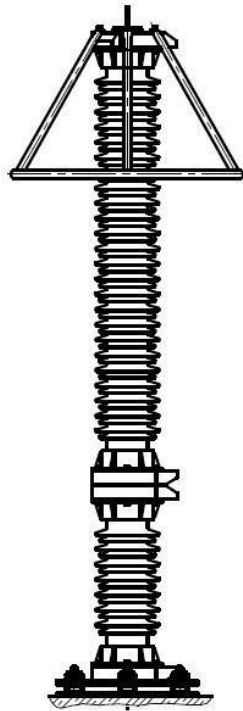


Рисунок 3.5 – Конструкція ОПН-ІІІ-110

У відповідності з вимогами безпеки експлуатації в конструкції ОПН-ІІІ-110 передбачаються пристрої для скидання тиску, які розташовані у верхній і середній частині апарату. Тиск в корпусі апарату, при якому спрацьовує запобіжний пристрій, повинен бути нижче тиску, при якому відбувається руйнування корпусу.

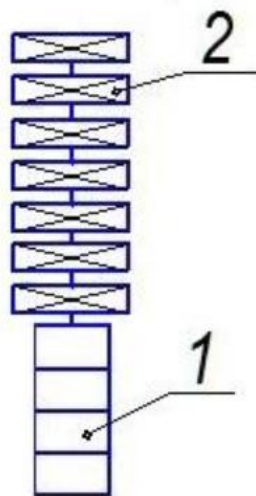


Рисунок 3.6 – Схема модифікованого ОПН

Висновок по розділу

Модифікований ОПН дозволить забезпечити більш високу надійність захист від перенапруг за рахунок збільшення електричної міцності та показників швидкості дугогасіння.

РОЗДІЛ 4

ВИПРОБУВАННЯ РОБОТИ МОДИФІКОВАНОГО ОБМЕЖУВАЧА

Розрахунки проводилися в програмному комплексі ЕМТР. Експеримент проводився на прикладі відключення фази С вимикача. Еквівалентна розрахункова схема для моделі із застосуванням ОПН в N та на шині з використанням іскрових проміжків представлена на рис. 4.1. Розрахунки виконані для довжини лінії 20 км. Результати розрахунків для пробивної напруги іскрових проміжків 260 кВ представлені в табл. 4.1. Осцилограми напруг, струмів і енергій для пробивної напруги іскрових проміжків 260 кВ представлені на рис. 4.2 – 4.7.

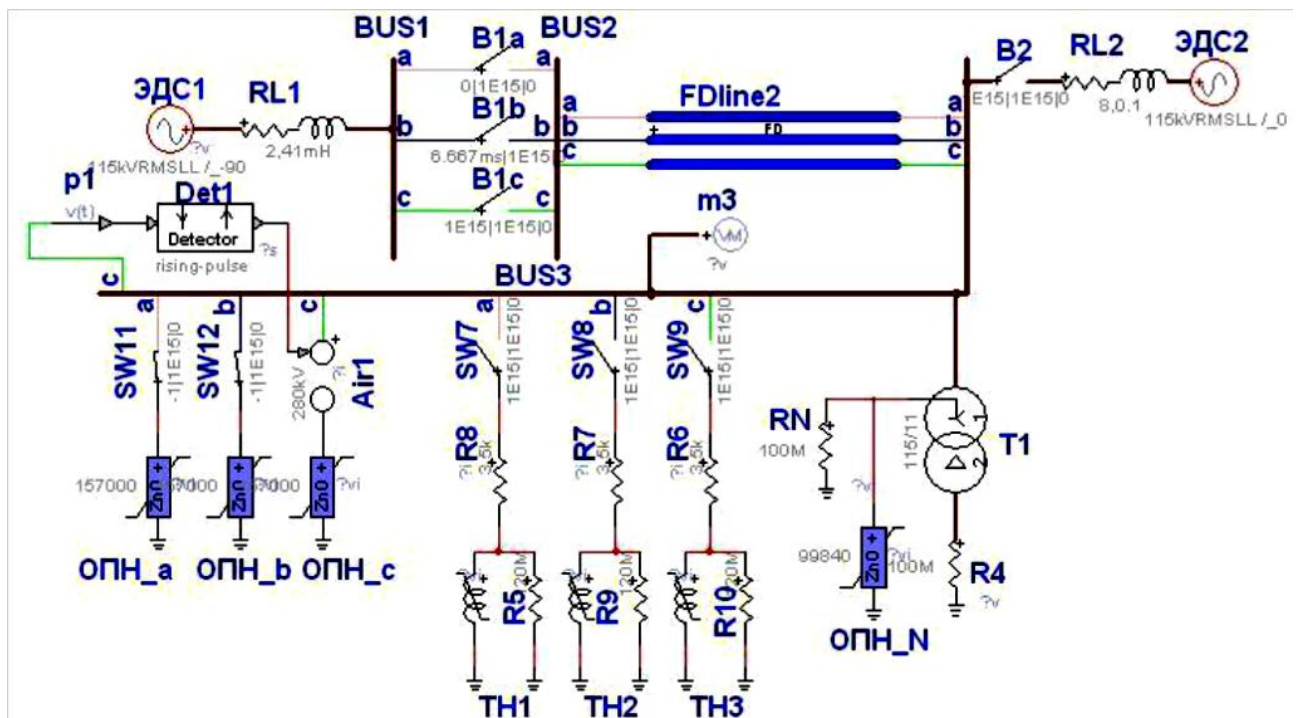


Рис. 4.1. Еквівалентна розрахункова схема с застосуванням ОПН в нейтралі та на шині з використанням іскрових проміжків

Данні, отримані в результаті розрахунків модельних схем із застосуванням ОПН в N і на шинах із використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ зведені до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати імітаційного моделювання схем із застосуванням ОПН в N і на шинах із використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ

Довжина лінії, км	Струм ОПН в N, А	Напруга ОПН в N, кВ	Енергія ОПН в N, кДж/кВ	Струм ОПН на шині, А	Напруга ОПН на шині, кВ	Енергія ОПН на шині кДж/кВ	Максимальна напруга в ф.С, кВ	Максимальна напруга в N, кВ	Напруга в ф.С у встановленому режимі,	Напруга в N у встановленому режимі,
20	1,717	117,2	0,022	124,5	204,6	1,1	262,2	117,2	250,3	93,2

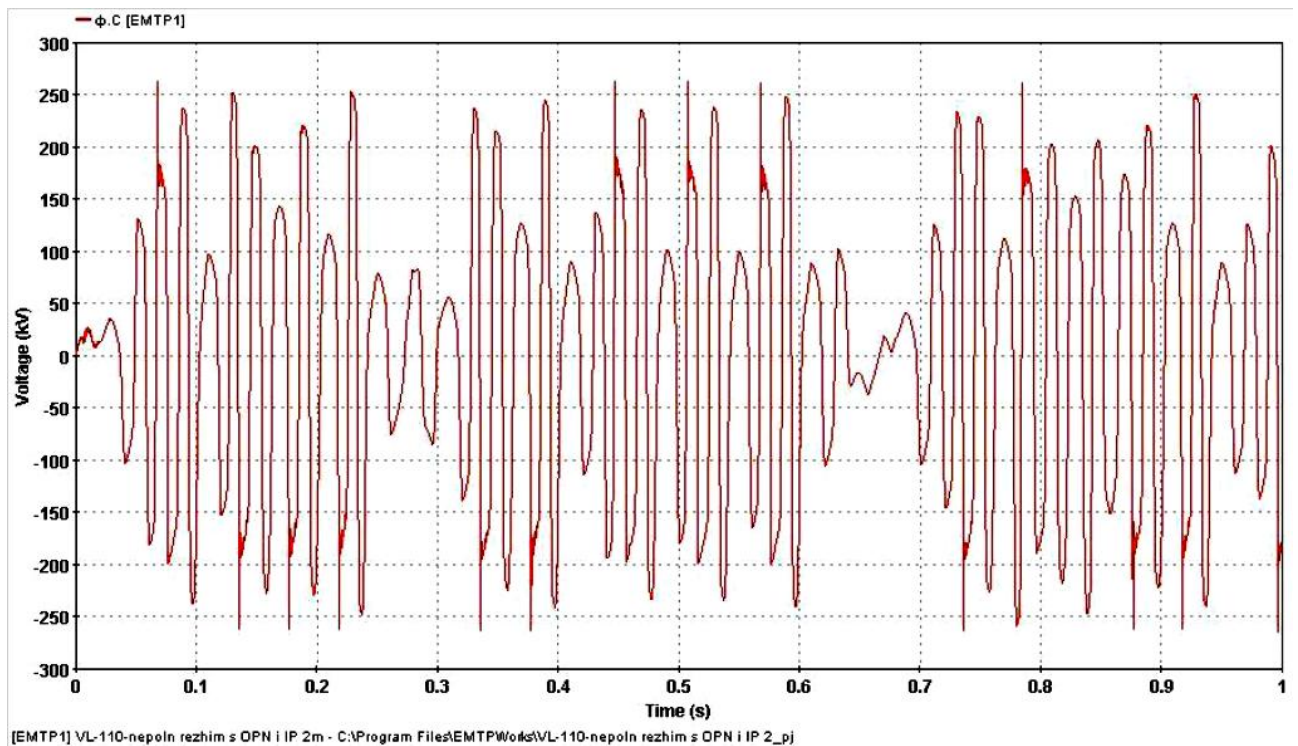


Рисунок 4.2 – Осцилограма напруг на фазі С із застосуванням ОПН в нейтралі та на шині з використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ при довжині ліній 20 км, побудована в програмному комплексі ЕМТР

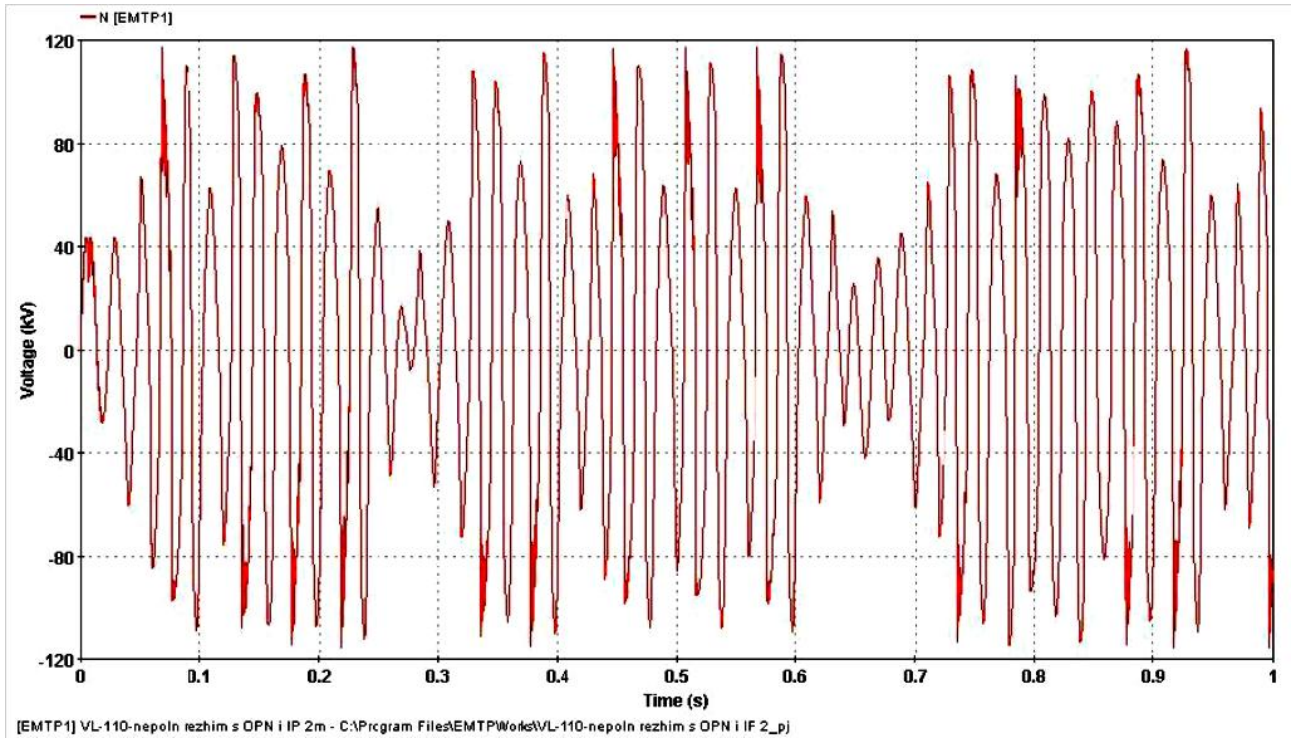


Рисунок 4.3 – Осцилограма напруг в нейтралі із застосуванням ОПН в нейтралі і на шині з використанням іскрових проміжків із пробивною напругою 260 кВ при довжині ліній 20 км, побудована в програмному комплексі ЕМТР

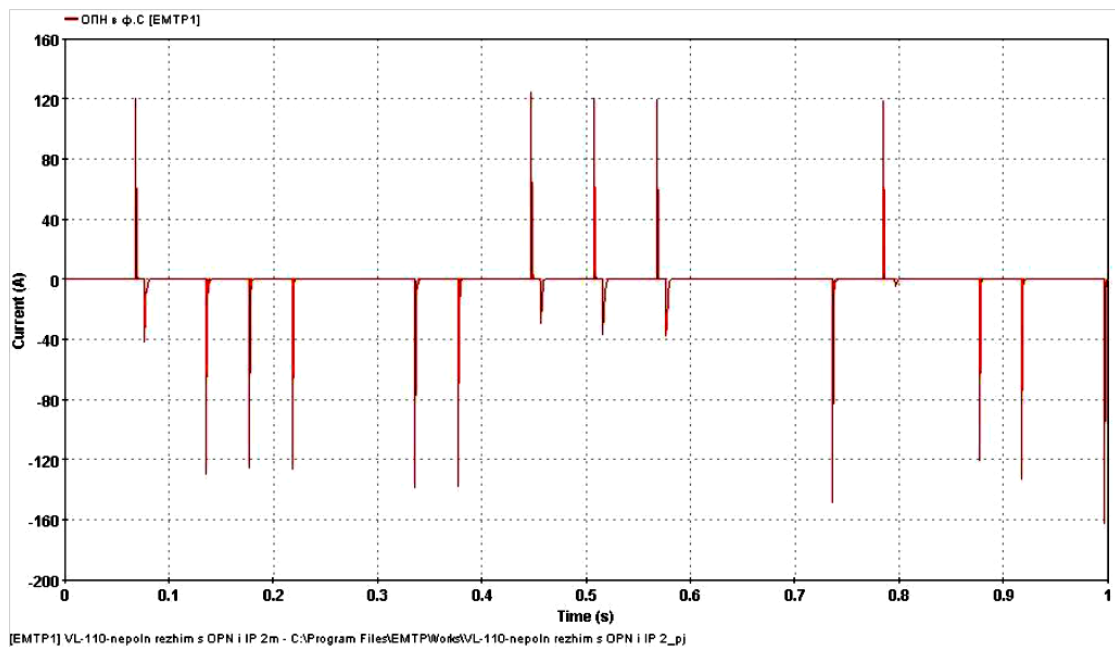


Рисунок 4.4 – Осцилограма струму в ОПН на шині із застосуванням ОПН в нейтралі і на шині з використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ при довжині лінії 20 км, побудована в програмному комплексі ЕМТР

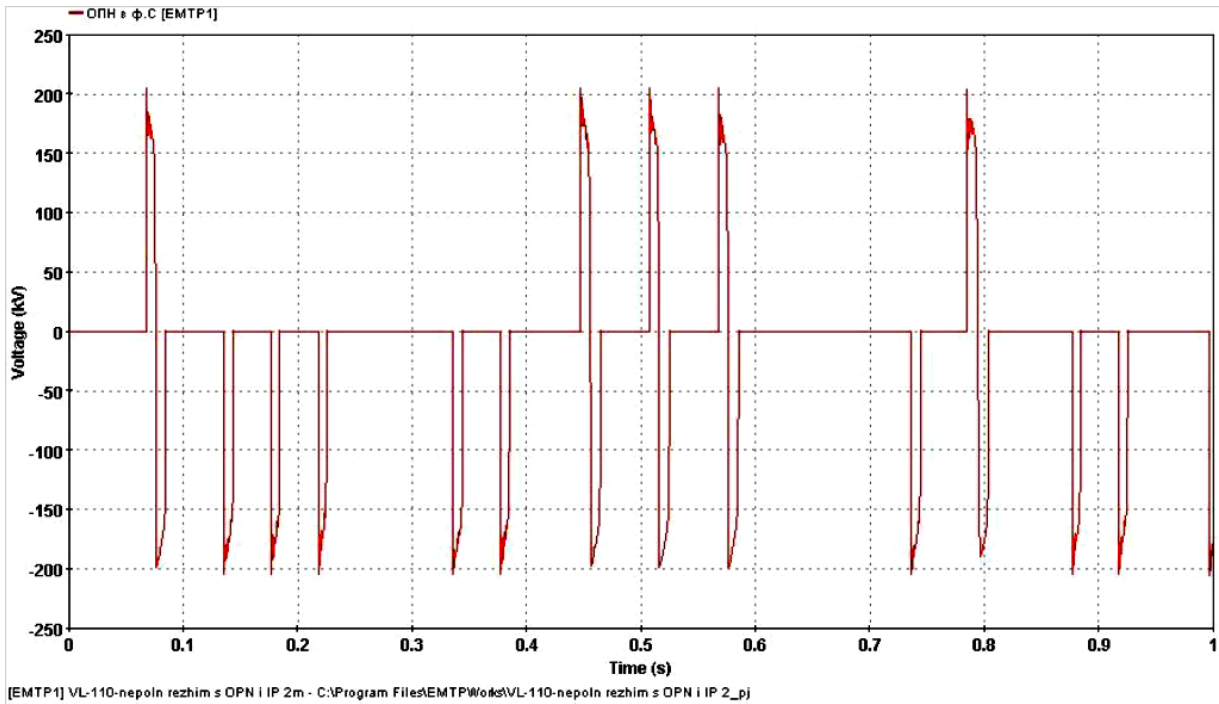


Рисунок 4.5 – Осцилограма напруг на ОПН на шинах із застосуванням ОПН в нейтралі і на шинах з використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ при довжині ліній 20 км, побудована в програмному комплексі ЕМТР

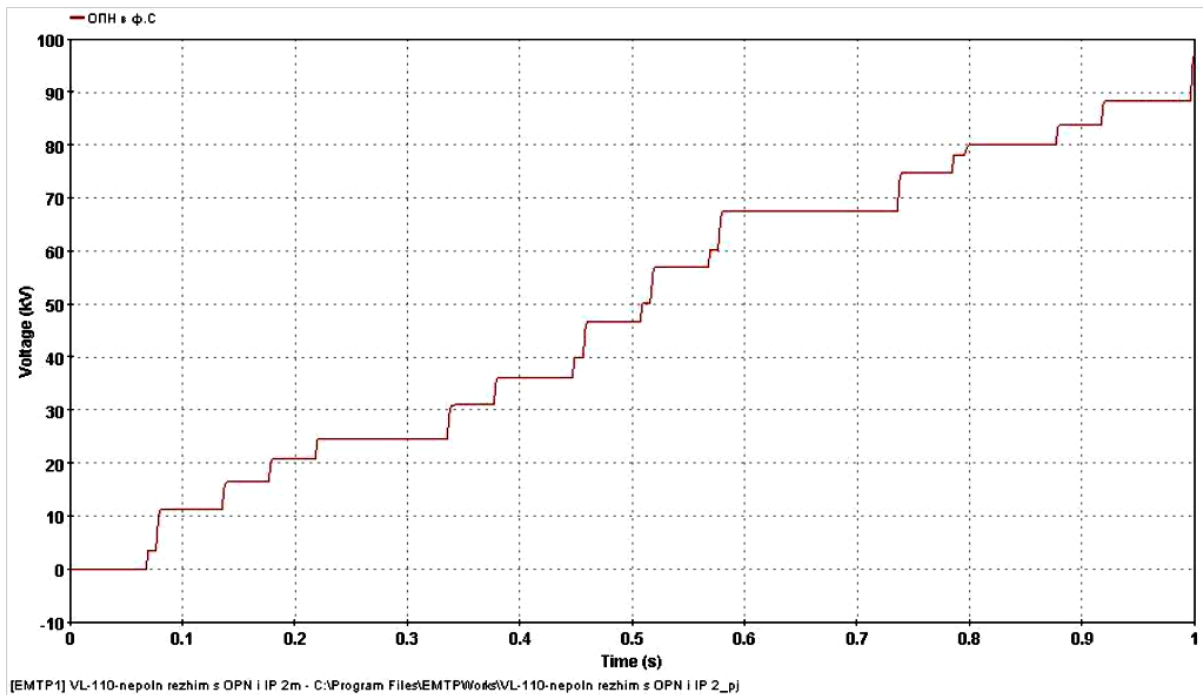


Рис. 4.6 – Осцилограма енергії ОПН на шині із застосуванням ОПН в нейтралі і на шині з використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ при довжині ліній 20 км, побудована в програмному комплексі ЕМТР

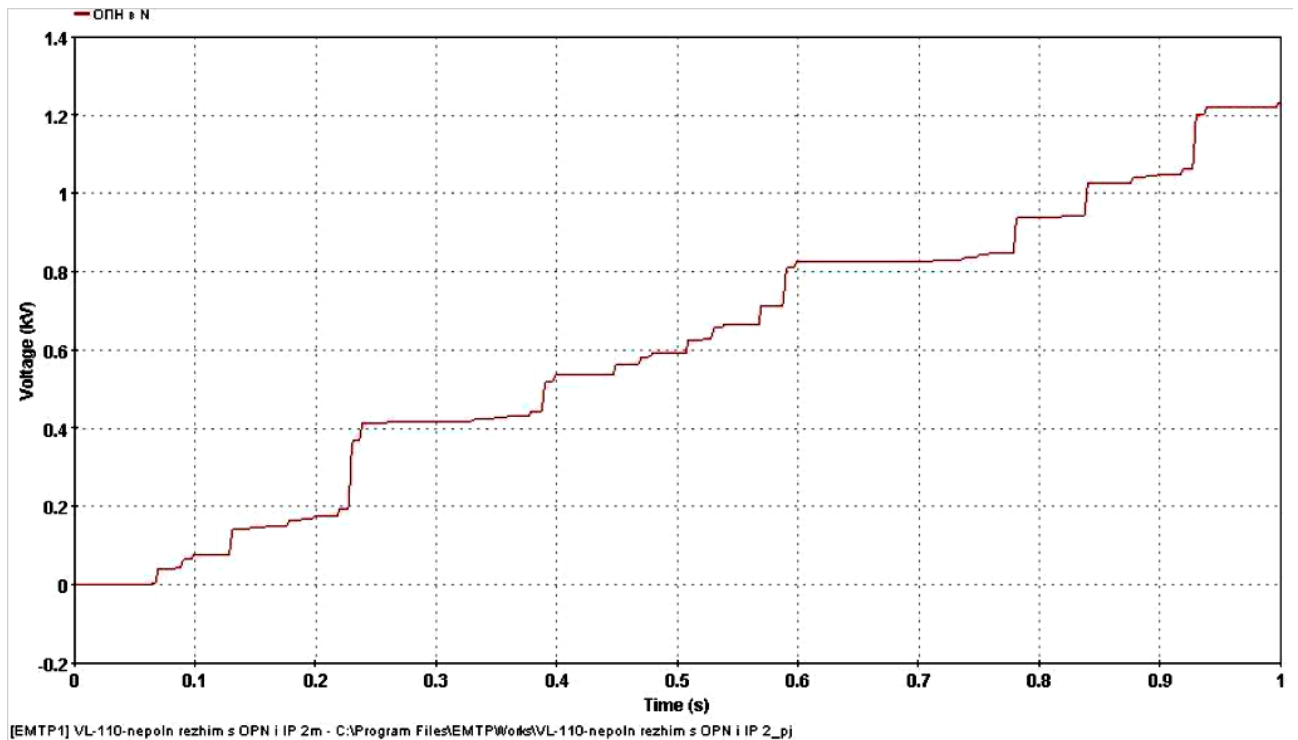


Рисунок 4.7 – Осциллограмма енергии ОПН в нейтралі з застосуванням ОПН в нейтралі і на шині з використанням іскрових проміжків з пробивною напругою 260 кВ

Висновок по розділу:

Проведене моделювання схем захисту трансформатора від перенапруг в програмному комплексі ЕМТР показало, що модифікований ОПН-ІІ показує більш кращі показники захисту та обмеження перенапруг, ніж базовий ОПН.

ВИСНОВКИ

Отримані результати оцінки ризику відмови електрообладнання через перенапруги, які дозволяють приймати рішення щодо технічних заходів, спрямованих на запобігання втрат в системах електропостачання: моніторинг динаміки ризику, модернізація обладнання (використання кабелів з високою діелектричної проникністю, застосування технічних засобів захисту від перенапруг.

Розроблений модифікований захисний апарат (ОПН-ІІІ-110) на напругу 110 кВ зі знизеним рівнем обмеження перенапруг в порівнянні зі стандартним обмежувачем перенапруг. В ході роботи розраховані основні технічні характеристики апарату, спроектована конструкція іскрових проміжків, а також конструкція самого апарату.

Представлена модель роботи ОПН-ІІІ показала більші показники надійності у порівнянні з обмеженням перенапруги одними лише варисторами без використання іскрових проміжків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акімов О.І., Сушко Д.Л. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
2. Базуткин В. В., Кадомская К. П., Костенко М. В., Михайлов Ю. А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них: Учебник для вузов; Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
3. Василега П. О. Електропостачання: Навчальний посібник. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2008. – 415 с.
4. Гаврилова Е. В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10кВ : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.02. Красноярск, 2011. 20 с.
5. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – Введ. 1999-01-01. – Москва : Госстандарт, 1998. – 49 с.
6. ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.
7. Дьяконов В. Ф. Математические пакеты расширения MATLAB : спец. справочник / В. Ф. Дьяконов, В. Ф. Круглов. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 480 с.
8. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
9. Електропостачання: навч. посіб. / Ф.П.Шкрабець; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 540 с.
10. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

11. Качесов В. Е. Перенапряжения и их ограничение при отключении заторможенных электродвигателей вакуумными выключателями / В. Е. Качесов // Электричество. – 2008. – № 3. – С. 15–26.
12. Коновалова Л.А., Рожкова Л.Д. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528с.
13. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БВХ-Петербург, 2005. – 736 с.
14. Манова, Н. А. Методы и модели исследования надежности электроэнергетических систем / Н. А. Манов [и др.] ; под ред. Н. А. Манова. – Сыктывкар, 2010. – 292 с.
15. Мукосеев Ю.Л. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1973. – 584 с.
16. Назарычев А. Н., Андреев Д. А., Блудов А. Ю., Педро Антонио. Математическая модель оценки расхода ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы. «Вестник ИГЭУ» Вып. 2. 2007. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-otsenki-rashoda-resursa-elektrooborudovaniya-s-uchetom-rezhimov-ego-raboty> (дата звернення)
17. ОПН ограничители перенапряжения [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://atrans.in.ua/opn-ogranichiteli-perenapryazheniya/c24..>
18. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Ф. А. Гиндуллин [и др.] – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
19. Рассказчиков А. В., Шульпин А. А., Шомов П. А., Кулагин С. М., Гоголюк В. В., Житомирский Б. Л. Определение риска возникновения ущерба при отказе электрооборудования подстанций. «Вестник ИГЭУ» Вып. 1. 2013. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-riska-vozniknoveniya-uscherba-pri-otkaze-elektrooborudovaniya-podstantsiy/viewer> (дата звернення)

20. Ротштейн А.П. Нечёткая надёжность алгоритмических процессов / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба. – Винница: Континент – ПРИМ, 1997. – 142 с.
21. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Под редакцией Афанасьева В. В. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
22. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2т. Т.1. Электроснабжение / Под общ. ред. А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.
23. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер [и др.] ; под ред. В. П. Ларионова ; пер. с нем. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
24. Халилов Ф. Х. Ограничители перенапряжений для защиты электрооборудования низкого, среднего и высокого напряжения предприятий нефти / Ф. Х. Халилов. – Санкт-Петербург: Позитрон, 2007. – 44 с.
25. Халилов Ф. Х., Евдокунин Г. А., Поляков В. С. и др. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений / Под ред. Халилова Ф. Х., Евдокунина Г. А., Таджибаева А. И. СПб., 2002. 260 с.
26. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
27. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – Москва : ДМК Пресс; Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 288 с.
28. Шевченко С. Ю., Довгалоук О. М., Піротті О. Є. Особливості вибору обмежувачів перенапруги в мережах 6-35 кВ. Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія “Технічні науки” : науковий збірник. Чернігів: Черніг. держ. технол. ун-т, 2013. – № 2 (65). – С. 224-230

29. Fusiek, G. Towards the development of a downhole optical voltage sensor for monitoring electrical submersible pumps / G. Fusiek, P. Niewczas, M. D. Judd // *Sensors and Actuators, A: Physical*. – 2012. – Vol. 184. – P. 173–181.

ДОДАТКИ

Нечіткі правила тримання ризику відмов обладнання

1. ЯКЩО (X_1 =мале) ТА (X_2 =помірна) ТА (X_3 =дуже часта) ТА (X_4 =небезпечна) ТО (R =несуттєвий)
2. ЯКЩО (X_1 =середнє) ТА (X_2 =помірна) ТА (X_3 =дуже часта) ТА (X_4 =небезпечна) ТО (R =середній)
3. ЯКЩО (X_1 =велике) ТА (X_2 =помірна) ТА (X_3 =дуже часта) ТА (X_4 =дуже небезпечна) ТО (R =суттєвий)

**Нечіткі правила визначення відмови обладнання в результаті дії
імпульсів напруг**

1. Якщо кратність перенапруги дуже сильна, а форма кривої дуже небезпечна, то слід прийняти максимальне можливе значення ризику відмови електротехнічного обладнання споживачів ($Y=1$).
2. Якщо кратність перенапруги дуже сильна, а форма кривої небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови електротехнічного обладнання споживачів $Y=0,8$.
3. Якщо кратність перенапруги дуже сильна, а форма кривої безпечна, то слід прийняти значення ризику відмови $Y=0,6$.
4. Якщо кратність перенапруги сильна, а форма кривої дуже небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови $Y=0,8$.
5. Якщо кратність перенапруги сильна, а форма кривої небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови $Y=0,6$.
6. Якщо кратність перенапруги сильна, а форма не небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,5$.
7. Якщо кратність перенапруги помірна, а форма дуже небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,6$.
8. Якщо кратність перенапруги помірна, а форма небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,5$.
9. Якщо кратність перенапруги помірна, а форма не небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,3$.
10. Якщо кратність перенапруги слабка, а форма дуже небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,5$.
11. Якщо кратність перенапруги слабка, а форма небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,3$.
12. Якщо кратність перенапруги слабка, а форма не небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,1$.
13. Якщо кратність перенапруги дуже слабка, а форма дуже небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,3$.
14. Якщо кратність перенапруги дуже слабка, а форма небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне $0,1$.
15. Якщо кратність перенапруги дуже слабка, а форма не небезпечна, то слід прийняти значення ризику відмови, рівне нулю.

1. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СИЛЬНА» ТА « X_2 ДУЖЕ НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=1$ »
2. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СИЛЬНА» ТА « X_2 НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,8$ »
3. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СИЛЬНА» ТА « X_2 БЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,6$ »
4. ЯКЩО « X_1 СИЛЬНА» ТА « X_2 ДУЖЕ НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,8$ »
5. ЯКЩО « X_1 СИЛЬНА» ТА « X_2 НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,6$ »
6. ЯКЩО « X_1 СИЛЬНА» ТА « X_2 БЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,5$ »
7. ЯКЩО « X_1 ПОМІРНА» ТА « X_2 ДУЖЕ НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,6$ »
8. ЯКЩО « X_1 ПОМІРНА» ТА « X_2 НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,5$ »
9. ЯКЩО « X_1 ПОМІРНА» ТА « X_2 БЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,3$ »
10. ЯКЩО « X_1 СЛАБКА» ТА « X_2 ДУЖЕ НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,5$ »
11. ЯКЩО « X_1 СЛАБКА» ТА « X_2 НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,3$ »
12. ЯКЩО « X_1 СЛАБКА» ТА « X_2 БЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,1$ »
13. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СЛАБКА» ТА « X_2 ДУЖЕ НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,3$ »
14. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СЛАБКА» ТА « X_2 НЕБЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0,1$ »
15. ЯКЩО « X_1 ДУЖЕ СЛАБКА» ТА « X_2 БЕЗПЕЧНА» ТО « $Y=0$ »