

УДК 621.311.4:551.5

Ліщак І.В., ст.викл. каф. ЕСМ,
Бінкевич Т.В., студент 2 курсу ІЕСК ©
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ

Розглянута узагальнена методика і алгоритм розрахунку електромагнітних хвильових процесів і надійності роботи схем грозозахисту підстанцій.

Розроблена і описана цифрова математична модель алгоритму розрахунку електромагнітних хвильових процесів і надійності роботи схем грозозахисту підстанцій.

Ключові слова: підстанція, грозозахист, атмосферні перенапруги, грозовий імпульс, набігаюча хвиля, розрядник, обмежувач перенапруг нелінійний.

Ефективність функціонування електроенергетичних систем залежить від багатьох факторів, у тому числі від грозозахисту їх об'єктів, в першу чергу ліній електропередавання і підстанцій. Підстанції є досить важливими об'єктами енергосистем, на території яких сконцентрована велика кількість важливого обладнання. Тому вони повинні бути надійно захищеними від впливу зовнішніх факторів, у тому числі від атмосферних перенапруг.

Атмосферні (грозові) перенапруги - це частковий випадок перенапруг, котрі можуть виникати під впливом зовнішніх ЕРС. Грозові перенапруги поділяються на:

- перенапруги на лінії і на підстанції внаслідок прямого удару блискавки;
- перенапруги на підстанції та електричній машині внаслідок надходження хвиль з лінії;
- перенапруги, індуковані на лінії та на ізоляції електричної машини.

Для мереж високої напруги практичне значення мають лише грозові розряди у вигляді "лінійної блискавки", котрі і обумовлюють грозові перенапруги.

Найбільші грозові перенапруги виникають внаслідок прямого удару блискавки в лінію або підстанцію. Струм блискавки має малу тривалість (1 – 100 мксек), але в окремих випадках може досягати і навіть перевищувати 100 кА. У місці удару виникає короткочасна (імпульсна) напруга, що вимірюється в мегавольтах, тобто перевищує імпульсну міцність ізоляції електропередач навіть найвищих класів напруги.

Внаслідок електромагнітної індукції близький удар блискавки створює також індуковану перенапругу, котра зазвичай призводить до деякого збільшення напруги на ізоляції. Від місця удару блискавки вздовж лінії зі швидкістю світла з малим спотворенням і загасанням розповсюджуються

електромагнітні хвилі. Дійшовши до підстанції, ці хвилі можуть викликати небезпечні перенапруги на ізоляції її обладнання.

Наявні схеми грозозахисту підстанцій забезпечують необхідну грозостійкість. Але проблема розробки нових схем, аналізу та удосконалення існуючих залишається актуальною.

Матеріали та методи. На кафедрі електричні системи та мережі НУ «ЛП» в 1974 р. була розроблена цифрова модель АСА ЕПН на алгоритмічній мові ФОРТРАН-IV. Ця модель мала обмежену кількість інформації для вводу, це вимагало робити багато спрощень, що приводило до збільшення похибки розрахунку. Програма не враховувала згладження фронту хвилі під впливом імпульсної корони. ВАХ розрядника апроксимували одним відрізком. Для зменшення кроку розрахунку схему заміщення підстанції потрібно розбивати на проміжні вузли, а через обмежену кількість інформації для вводу цього зробити не вдавалось. Вітки схеми заміщення зводились до однієї довжини згідно з кроком розрахунку, що збільшувало похибку обчислень. Вона потребувала наступних розрахунків вручну:

- параметрів схеми заміщення;
- розбиття схеми згідно кроку розрахунку по довжини;
- задання хвилі точками;
- вимагала ручного формування рівнянь напруг в вузлі, падаючих та відбитих хвиль;
- задання шляху поширення хвилі;

На базі вище цифрової математичної моделі було створено програму для розрахунку електромагнітних хвильових процесів на підстанції. Програма створювалась в програмному середовищі Borland Delphi 7. Це дозволило створити зручний інтерфейс, спростити підготовку до розрахунку схеми заміщення підстанції, автоматично перераховувати параметри обладнання, розширити діапазон розрахунку, ввести ряд додаткових факторів, які впливають на точність розрахунку, реалізувати методи, які потребують високого рівня комп'ютерної техніки і на час створення попередньої моделі не реалізовувались через неприпустимо довгий час виконання.

У програму закладено наступні алгоритми:

- алгоритм визначення шляху поширення хвилі грозової перенапруги;
- формалізований алгоритм формування рівнянь вузла;
- алгоритм перерахунку вольт-секундної характеристики лінійної ізоляції;
- алгоритм деформації хвилі під впливом імпульсної корони і при перекритті лінійної ізоляції;
- алгоритм перерахунку параметрів схеми заміщення;
- алгоритм розбиття вітки на проміжні вузли для досягнення потрібного кроку розрахунку;
- алгоритм апроксимації ВАХ розрядника і ОПНа;
- алгоритм апроксимації кривої небезпечних параметрів.

На базі цих алгоритмів складено алгоритм розрахунку хвильових процесів на підстанції і алгоритм визначення кривих небезпечних параметрів підстанції.

Основною перевагою нової програми є створення формалізованого алгоритму формування рівнянь для розрахунку хвильових процесів методом біжучих хвиль для довільної схеми. Це є основний алгоритм програми, на якому базуються всі розрахунки. Він складається з двох взаємопов'язаних алгоритмів:

- 1) алгоритм визначення шляху поширення хвилі по підстанції;
- 2) алгоритм формування рівнянь для заданої послідовності вузлів.

Інтерфейс програми

Для спрощення вводу даних, зміни параметрів досліду, представлення результатів у зручному вигляді нами був розроблений інтерфейс програми.

При запуску програми перед користувачем відкривається головне вікно програми (рис.1.), на якому розміщені кнопки керування, вікно відображення вхідної інформації, вікно відображення розрахункових даних, дві закладки для вибору полів графіків.

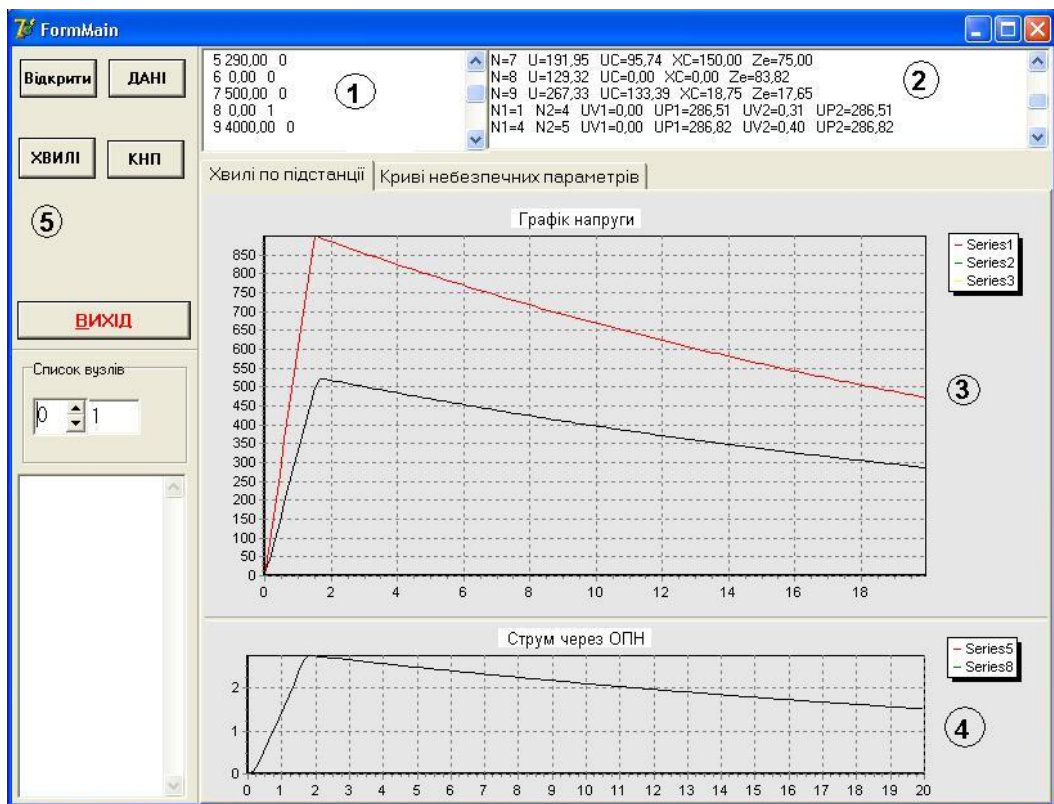


Рис.1. Головне вікно

1 – вікно відображення даних вузлів і віток; 2 – вікно виводу результатів розрахунків; 3 – поле виводу графіка в вузлі; 4 – поле виводу графіка струму через ОПН; 5 – панель кнопок керування.

При натисненні кнопки відкривається діалогове вікно (Рис.2.) для вводу даних необхідних для розрахунку. Вікно містить три закладки:

- параметри хвилі (Рис.2. а). Тут задається амплітуда, довжина фронту і загальна довжина падаючої хвилі, а також крок розрахунку;
- параметри параметри т-рів і ЛЕП. (Рис.2. б). Тут вводиться характеристика лінійної ізоляції, допустима імпульсна напруга трансформатора, характеристика лінії по, якій набігає хвиля.
- розрядник/ОПН (Рис.2 в). В цьому вікні вводяться точки ВАХ і тип захисного пристрою.

Параметри розрядників

Параметри хвилі | Розрядник/ОПН | Параметри Т-рів і ЛЕП

Тип задання хвилі

Рівнянням Точками

Рівнянням

tf, мкс: 1,500 txv, мкс: 20,000

Uamp, кВ: 900,000 dL, м: 45,000

dt: 0,013

Точками

Кількість точок: 0

U	T

Ok Cancel

а)

Параметри розрядників

Параметри хвилі | Розрядник/ОПН | Параметри Т-рів і ЛЕП

Параметри обладнання

hcp, м: 22,000 Rпр, см: 0,014

Uк, кВ: 33000,000

Довжина пробігу хвилі L, м: 1,000

Враховувати перекриття ізоляції Да

Max допустима напруга т-ра: 940,000

Параметри ізоляція

U_{0.2}: 1,800

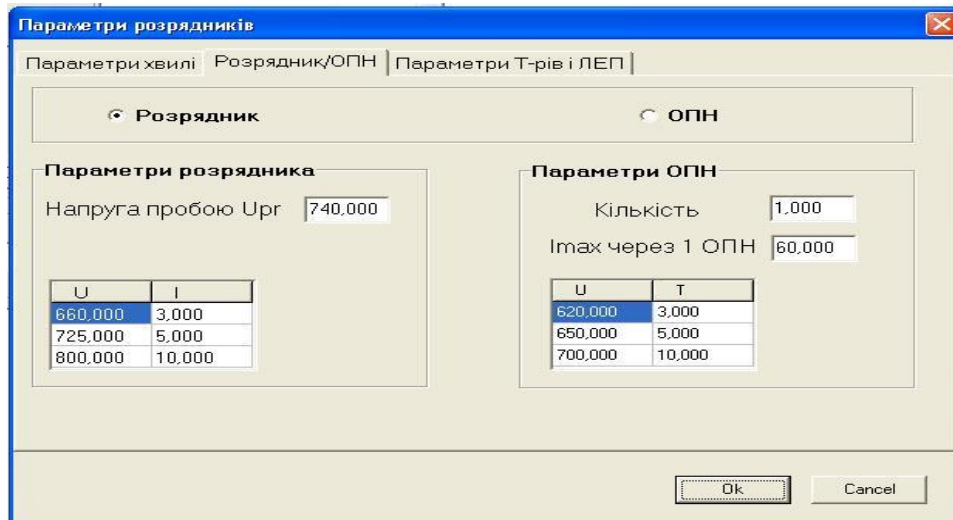
T1: 2,000

U_{0.5}: 1,400

T2: 10,000

Ok Cancel

б)



в)

Рис.2. Вигляд вікна вводу даних.

Алгоритм визначення шляху поширення хвилі

Схема електричних з'єднань і геометричні розміри кожної підстанції різняться між собою, а метод біжучих хвиль потребує обчислення напруги в вузлах в тій послідовності, в якій на них набігає падаюча хвиля. Крім того до підстанції можуть підходити декілька ліній і потрібно розглянути варіанти приходу хвилі грозової перенапруги з кожної з них. Виникла потреба створити універсальний алгоритм, який би визначав шлях поширення хвилі по підстанції і не вимагав проводити додаткових розрахунків вручну.

Для можливості створення такого алгоритму геометричну схему підстанції розділили на два типи елементів: вузли і вітки. Інформація про структуру схеми містять вітки, оскільки вітка задається номером початку і номером кінця це дає можливість виявляти точки з'єднання суміжних віток.

Для визначення шляху поширення хвилі задається номер першого вузла на який набігає хвиля. Спочатку визначається кількість приєднань кожного вузла, якщо вузол має більше двох приєднань, то він вноситься в масив вузлів з розгалуженнями. По номеру першого вузла з масиву віток вибирається вітка, яка приєднана до нього (причому номер вузла початку і кінця вітки задаються в довільному порядку). Далі номер вітки вноситься в масив шляху і відбувається перехід до вузла кінця вітки, для якого визначають приєднану вітку. Якщо вузол має більше двох приєднань, то алгоритм, прорахувавши шлях по першому приєднанні повертається знов до вузла з розгалуженням і так доки всі приєднання не будуть прораховані. Даний алгоритм формує масив віток в тій послідовності, в якій по них буде проходити хвиля.

При реалізації даного алгоритму в середовищі Borland Delphi 7 був використаний рекурсивний виклик програми. Рекурсивний виклик дозволяє програмі в кінці циклу викликати саму себе, що значно спрощує реалізацію складних циклів.

Алгоритм формування рівнянь

Для вузла було складене рівняння, яке містить всі можливі доданки, і в залежності від елементів які містить вузол, від кількості ліній які приєднані до вузла і параметрів розрахунку в рівняння вводяться відповідні значення. Перехід від вузла до вузла відбувається по масиву віток, який формується за допомогою алгоритму визначення шляху.

В середовищі Borland Delphi 7 застосовуючи методи об'єктно орієнтованого програмування вдалося достатньо компактно і універсально реалізувати цей алгоритм. Програма не загромаджує пам'ять комп'ютера непотрібними проміжними даними. Дані з попереднього кроку, які потрібні в розрахунку, використовують до того, як відбувається їх перерахунок, а і дані потрібні для виводу записуються в окремий масив і виводяться як в чисельній, так і в графічній формі.

Алгоритм розбиття вітки на проміжні вузли

За методом біжучих хвиль крок розрахунку по часу зумовлений довжинами віток схеми чи навпаки. Даний алгоритм дозволяє розраховувати схему, з різними довжинами віток, з різним кроком, який орієнтований на найменшу вітку. Тобто крок не може бути більшим від найменшої вітки. Якщо довжина вітки не кратна кроку розрахунку то результат автоматично заокруглюється до найближчого цілого числа, що дає значно меншу похибку ніж зведення схеми до віток з однаковою довжиною.

Реалізація цього алгоритму відкрила більш широкий діапазон дослідження хвильових процесів, дала можливість проводити розрахунок в схемі при реальних геометричних розмірах і розташуванні обладнання. Але навіть з сучасною комп'ютерною технікою при малих кроках час розрахунку збільшується, а при розрахунку кривих небезпечних параметрів він сягає декількох хвилин

Алгоритми врахування деформації хвиль грозової перенапруги

Для дослідження впливу різних факторів на надійність грозозахисту підстанції важливим моментом було врахувати різні випадки деформації і зрізу. Тому для проведення розрахунку було

У процесі роботи програми на кожному кроці розрахунку напруга падаючої хвилі, в місці удару, порівнюється з ВСХ лінійної ізоляції. Якщо імпульсна міцність лінійної ізоляції витримує то вважається, що на підстанцію приходить хвиля повного імпульсу. У випадку коли в один момент часу напруга падаючої хвилі перевищує міцність ізоляції то амплітуда і довжина хвилі в цей момент часу зрізається і на підстанцію поширюється хвиля неповного імпульсу (Рис.3)

Вольт-секундна характеристика (ВСХ) лінійної ізоляції описується формулою Горева-Машкілейсона:

$$u(t) = A_o \cdot \sqrt{1 + \frac{B_o}{t}}$$

Параметри формули визначаються через імпульсну розрядну напругу при передрозрядному часі 2 мкс та 50 %-ву імпульсну розрядну напругу (при 20 мкс). (Ці дані беруться з характеристик лінійної ізоляції).

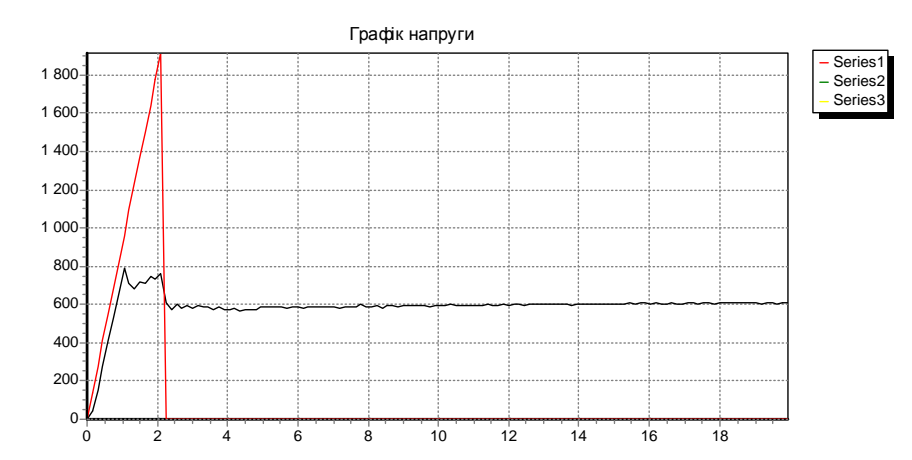


Рис.3. Зріз хвилі через перекриття лінійної ізоляції

Вольт-секундна характеристика (ВСХ) лінійної ізоляції описується формулою Горева-Машкілейсона:

$$u(t) = A_o \cdot \sqrt{1 + \frac{B_o}{t}}$$

Параметри формули визначаються через імпульсну розрядну напругу при передрозрядному часі 2 мкс та 50 %-ву імпульсну розрядну напругу (при 20 мкс). (Ці дані беруться з характеристик лінійної ізоляції).

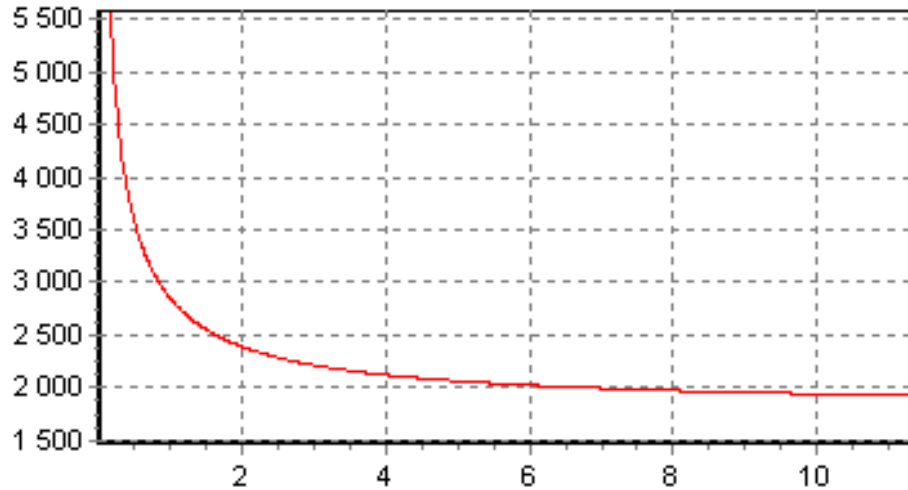


Рис.4. Вольт-секундна характеристика лінійної ізоляції

На деформацію хвилі також суттєво впливає імпульсна корона. На кожному кроці розрахунку напруга падаючої хвилі, з початковими параметрами (Рис.5. крива 1), порівнюється з напругою виникнення корони, якщо напруга корони не задана, то вважається, що хвиля виникла на підході до підстанції і деформації під впливом корони не відбувається. В момент, коли напруга хвилі перевищує напругу коронного чохла, за формулою (1) визначається зсув фронту хвилі. Після визначення зсуву Δt шукається точка перетину нового фронту хвилі з хвостом (Рис.5. точка U_{a1}). За точкою перетину визначається нова амплітуда і нова довжина фронту. Після визначення нової амплітуди і фронту будується графік нової хвилі (Рис.5. крива 2) і розрахунок продовжується по ньому. Тобто врахувавши деформацію хвилі після пробігу заданої відстані L на вхід підстанції приходить хвиля з деформованим фронтом.

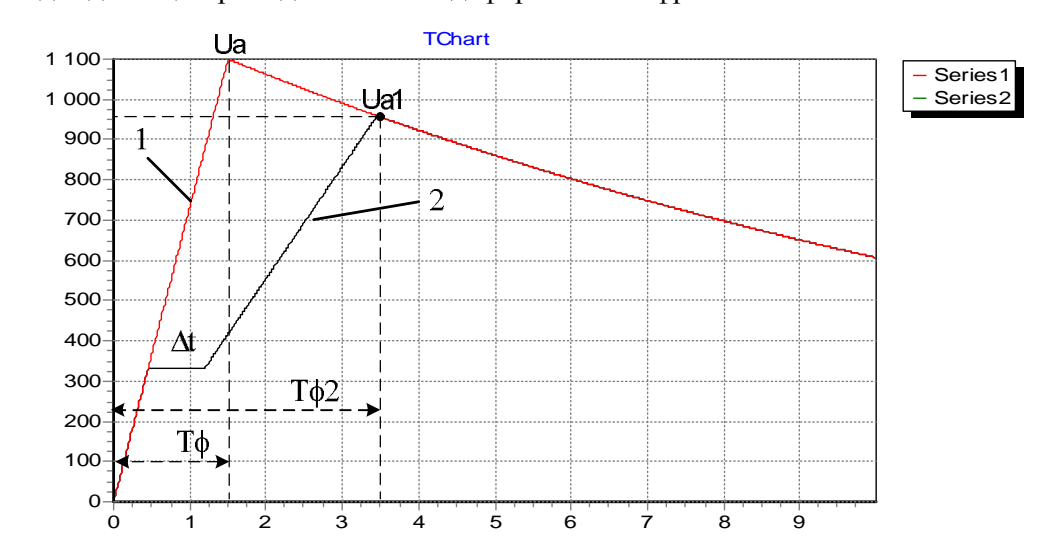


Рис.5. Зріз хвилі через імпульсну корону

Алгоритми апроксимації ВАХ розрядника і ОПНа

Для дослідження надійності роботи силового обладнання підстанції потрібно обов’язково моделювати вузли з вентильними розрядниками і ОПНами.

Характеристика розрядника задається трьома точками, які можна взяти з будь-якої довідкової літератури і імпульсною пробивною напругою. ВАХ розрядника апроксимується трьома ділянками, як це зазначено в пункті . Під час розрахунку напруга вузла, де встановлений розрядник, порівнюється з пробивною напругою розрядника. Після перевищення пробивної напруги розрядника в рівняння вводиться доданок, який містить опір і ЕРС розрядника, тим самим моделюючи його роботу. На кожній з трьох ділянок ВАХ розрядника він має різний опір і ЕРС, тому на кожному кроці відбувається перевірка якій ділянці ВАХ відповідає напруга в даний момент часу. При

переході напруги з однієї ділянки на іншу відповідно змінюється величина опору і ЕРС розрядника.

Апроксимація розрядника трьома відрізками дозволяє достатньо точно врахувати вплив його спрацювання на перебіг хвильового електромагнітного процесу на підстанції, і, відповідно, з більшою точністю оцінити надійність захисту силового обладнання.

Характеристика ОПНа моделюється аналогічно характеристиці розрядника за винятком того, що ОПН постійно під'єднаний до шин і він немає напруги пробою. Тому параметри заміщення ОПНа враховуються з самого початку розрахунку, відповідно до того, на якій ділянці ВАХ перебуває напруга вузла.

Висновки:

1. Ефективність об'єктів електроенергетичних систем в значній мірі залежить від надійності роботи схем грозозахисту. Тому розробка нових схем грозозахисту є актуальна і в даний час.

2. При розробці нових схем грозозахисту чи аналізі роботи існуючих постає потреба розрахунку електромагнітних хвильових процесів і аналізу надійності. Тому розробка універсальної цифрової математичної моделі, яка б дозволяла проводити такі розрахунки, є актуальним.

3. На перебіг електромагнітних хвильових процесів впливає багато випадкових факторів. Такі фактори як деформація хвилі під впливом імпульсної корони, зріз хвилі при перекритті лінійної ізоляції можуть суттєво міняти результат аналізу. Тому вказані фактори потрібно враховувати при розробці цифрової математичної моделі.

4. В даній роботі розроблена цифрова математична модель розрахунку електромагнітних хвильових процесів і аналізу надійності схем грозозахисту підстанції. Вона має наступні переваги:

- автоматичне визначення шляху поширення хвилі;
- формалізований алгоритм формування рівнянь за методом біжучих хвиль;
- автоматичний перерахунок параметрів схеми при зміні кроку розрахунку;
- автоматичне розбиття віток на проміжні вузли при зміні кроку розрахунку;
- можливість моделювання роботи вентильних розрядників і обмежувачів перенапруги нелінійних;
- врахування деформації хвилі під впливом імпульсної корони після пробігу деякої відстані;
- побудова кривих небезпечних хвиль при різних комбінаціях випадкових факторів.

5. За допомогою запропонованої моделі проаналізовано вплив кроку розрахунку на результат обчислень і встановлено, що задавати крок менший 5-10 м не доцільно, оскільки це не вносить суттєвих покращень результатів. При малих габаритах схеми підстанції чи при потребі аналізу при реальному

розташуванні елементів схеми за крок можна вибрати довжину найменшої вітки або найбільше спільне кратне всіх віток.

6. При знаходженні кривих небезпечних хвиль і врахуванні деформації хвилі зменшення кроку розрахунку не вносить помітних відмінностей результатів, а тільки збільшує час обчислення. При схемах підстанції з великою кількістю вузлів час розрахунку може становити декілька хвилин.

7. Проведено порівняння роботи схем грозозахисту вентиляними розрядниками чи обмежувачами перенапруги нелінійними. При встановленні на підстанції ОПН-ів потрібно враховувати той факт, що ОПН ефективний, якщо він встановлений перед об'єктом захисту на шляху поширення хвилі до нього, в іншому випадку встановлення ОПН-а недоцільно.

Література

1. Разевиг Д. В. Техника высоких напряжений. Москва, «Энергия», 1976р, с. 227.
2. Костенко М. В., Єфремов Б. В. Аналіз надійності грозозащити подстанцій. Ленінград, «Наука», 1981р
3. Гольдштейн В. Г., Ефимов Б. В., Некрасов А. В. Аналіз грозозащити подстанцій от набегающих волн атмосферного перенапряжения с помощью ЦВМ «Проминь». Электрические станции, 1970г, №4
4. Руководящие указания по защите электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молний и волн, набегающих с линий электропередач. Москва, 1975г.
5. Александров Г.Н. Коронный разряд на линиях электропередачи. Ленинград, 1964г.
6. Кинаш Б.М. Способы расчета вероятного числа случаев появления на подстанции опасных волн перенапряжения. Львов, 1970г.
8. РАО «ЕЭС России». Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. 2-е изд. С-П.: Изд-во ПЭИПК, 1999
9. Тиходеев Н.Н. , Щур С.С.Изоляция электрических сетей (методика выбора статистической координации и приведения к норме). Ленинград, «Энергия», 1979г.

Рецензент – д.т.н., професор Ціж Б.Р.