

МАГІСТРСЬКА РОБОТА

02.03 – МР. 1417 «С» 2021.08.09. 001 ПЗ

БОЧАРНІКОВА ІВАНА ВАЛЕРІЙОВИЧА

2021 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

НУБІП України

УДК 621.3

ПОГОДЖЕНО

Директор Інституту енергетики,
автоматики і енергозбереження

Каплун В.В.

(підпис)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

електропостачання ім. проф. В.М. Синькова

Козирський
В.В.

(підпис)

« ____ » _____ 2021 р.

« ____ » _____ 2021 р.

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему «Моделювання роботи нелінійних обмежувачів перенапруг»

Спеціальність
електромеханіка

141 – «Електроенергетика, електротехніка та

(код і назва)

Освітня програма

електричні мережі
(назва)

Орієнтація освітньої програми

освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

НУБІП України

Виконав

Бочарніков І.В.

(підпис)

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н., доцент

Гай О.В.

(підпис)

НУБІП України

Нормоконтроль

К.Т.Н., доцент

Петренко А.В.

(підпис)

Консультанти

Охорона праці, к.т.н., доцент

Омельчук А.О.

(підпис)

НУБІП України

Економічна частина, к.т.н., доцент

Волошин С.М.

(підпис)

Київ – 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

електропостачання ім. проф. В.М. Сеньків

Козирський В.В.

(підпис)

«___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
Бочарнікову Івану Валерійовичу

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітня програма: електричні мережі

Орієнтація освітньої програми: освітньо-виробнича

Тема магістерської роботи: «Модельовання роботи нелінійних обмежувачів перенапруг»
затверджена наказом ректора НУБіП України від 08.09.2021 №175«С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру: 15.11.2021 р.

Вихідні дані до магістерської роботи: завдання, матеріали досліджень та розробки кафедри, дані зібрані на виробництві.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Захист від перенапруги - історична довідка.
2. Вибір ПЗ та його обґрунтування.

Методологія та практичне застосування розрахунків моделей у обраному ПЗ.

4. Дослідження нормативно правової бази відповідно завдання

Перелік графічного матеріалу: презентація з 20 слайдів.

Дата видачі завдання 08.09.2021 р.

Керівник магістерської роботи

Волошин С.М.

Завдання прийняв до виконання

Бочарніков І.В.

ЗМІСТ:

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ІСТОРИОГРАФІЯ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУГИ.....	7
1.1 Поява та удосконалення захищених пристроїв.....	7
1.2 Загальні принципи роботи та сфери застосування нелінійних обмежувачів перенапруги.....	16
1.3 Основні типи нелінійних обмежувачів.....	21
РОЗДІЛ 2 ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕСПЕЧЕННЯ.....	26
2.1 Опис програми ЕМТР – сучасного інструменту для розрахунку електромагнітних перехідних процесів.....	26
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЕМТР.....	31
3.1 Опис розрахункової моделі.....	31
3.2 Модель приєднаних до ВРП повітряних ліній.....	32
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЕМТР.....	38
4.1 Моделювання імпульсу струму блискавки.....	38
4.2 Розрахунок грозових перенапруг на підстанції.....	41
4.3 Розрахунок необхідної довжини тросового підходу ПЛ.....	52
4.4 Облік зворотних перекриттів на приєднаних ПЛ.....	56
4.5 Оцінка вірогідної кількості років якісної безаварійної роботи обладнання підстанції при грозових перенапругах.....	60
4.6 Розрахунок імпульсних струмів і енергій, що виділяються, при грозових перенапругах.....	62
4.7 Розрахунок амплітуди імпульсного струму в ОПН у режимі обмеження грозових перенапруг.....	62

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ЕКОЛОГІЯ.....	76
5.1 Нормативно правова база, що регламентує застосування ОПН.....	76

5.2 Вентильні розрядники.....	79
5.3 обмежувачі перенапруг нелінійні.....	79
5.4 Трансформаторні підстанції.....	79
5.5 Основні вимоги до установалення ВР та ОПН.....	80
5.6 Основні вимоги до монтажу ВР та ОПН.....	81

ВИСНОВКИ.....	82
ВИКОРИСТАНІ У РОБОТІ МАТЕРІАЛИ ТА ДЖЕРЕЛА.....	86

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НУБІП України

ПС – трансформаторна підстанція

АТ – автотрансформатор

НУБІП України

ВРП – відкритий розподільний пристрій

ЗРП – закритий розподільний пристрій

ПЛ – повітряна лінія

НУБІП України

ТС – трансформатори струму

ТН – трансформатори напруги

ОПН – обмежувач перенапруги нелінійний

НУБІП України

КЗ – коротке замикання

АПК – Агро промисловий комплекс

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВСТУП

НУБІП України

Сучасний агропромисловий комплекс економіки неможливий без

живлення, а ОЕС України - без ВЕЛ, та трансформаторних підстанцій великої потужності. Доказом чого може слугувати введена у минулому році в

НУБІП України

експлуатацію ЛПС 500 кВ «Кременська», що обійшлася бюджету України у 1,281 млрд. грн. Сьогодні атмосферні явища, пов'язані зі змінами клімату,

значно ускладнюють безперерйну роботу всіх елементів ліній електромереж, особливо для устаткування вік якого більше за 10 років.

НУБІП України

Тому завдання цієї роботи полягає у вивченні сучасних інструментів для моделювання, розрахунків та складання найбільш досконалих та оптимальних у економічному плані схем устаткування, яке найближчим

часом потребуватиме модернізації.

НУБІП України

Досить зручним у використанні та багатим на інструментарій, необхідний для ведення розрахунків та складання схем, - є програмний комплекс EMTP-RV. За допомогою EMTP-RV далі буде проведена низка

розрахунків по моделюванню різних грозових перенапруг та їх впливу на різні елементи електромереж великої потужності.

НУБІП України

Моделювання роботи нелінійних обмежувачів перенапруг яке буде проводитись у даній роботі використовує ОПН найбільш розповсюджені, та ті, що незабаром потребуватимуть модернізації та повної заміни, не тільки за

віком експлуатації, а й в силу природних втат.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 1

ІСТОРИОГРАФІЯ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ВІД ПЕРЕНАПРУТИ

НУБІП України

1.1 Появлення та удосконалення захисних пристроїв

У сучасному світі, де на кожному кроці людину оточують безлічі електроприладів, найважливішу роль у безпечному та стабільному їх функціонуванні, відіграють саме захисні пристрої. У далекому 1729 р британській вчений Стівен Грей визначив поняття «провідник» та «ізолятор». У той час електростатичні машини та лабораторні прилади потребували хоч які електроізолятори. Спочатку для цього досить вдало широко застосовувалося скло. У перших акумуляторних батареях також використовувалося скло як в якості контейнера, так і ізолятора.

Але поява у 1855-1860 рр. телеграфу дала поштовх для застосування ізоляторів з емальованої твердої порцеляни, які використовувалися на стовпах для кріплення телеграфних проводів. Саме тоді й з'ясувалося, що вироби з порцеляни мають кращі ізоляційні властивості, ніж скляні.

Вже у 1860 р на, набуваючи все більшу популярність, телеграфних лініях використовувалися тисячі порцелянових ізоляторів, кратно збільшуючись з року в рік. Згодом електротехнічний фарфор проходить суворі численні випробування, до того - кожен виробник робить його за власним рецептом, який часто пов'язаний зі складом наявних поблизу виробництва руд. Але як правило, це були суміші каоліну, глини, кварцу й польового шпату, що піддавався термічній обробці у температурі близько 1400 °С. Польовий же шпат, температура плавлення якого значно нижче, на відміну інших компонентів, забезпечував застосування порцелянової суміші. Основні компоненти суміші були наступними: 50% каоліну, 25% польового шпату, 25% кварцу. Тверда порцеляна виявилася відмінним

електричним ізолятором: у більшості випадків водонепроникна, кислотостійка та витривала до великих перепадів температур без утворення тріщин. Глянцева фарфорова емаль надавала поверхні гладку текстуру, яка не мала пір.

Отже на Всесвітній виставці у 1878 р свою найсучаснішу продукцію демонструють вже два виробники фарфорових ізоляторів з Парижу. А три роки потому, на Міжнародній виставці електрообладнання, що проходила у 1881 р в Парижі, вже були присутні десятки виробників ізоляційних фарфорових виробів для телеграфії, а також для електричних мереж та

ланцюгів, які починають з'являтися та набувають поширеності у цей період. У 1888 р порцелянові ізолятори різних виробників повсюдно використовуються на стовпах вуличного освітлення у всьому цивілізованому світі. А наприкінці XIX століття порцелянові ізолюючі елементи почали

широко використовуватися у більшості побутових електроприладів: розподільні коробки, патрони для електричних лампочок, блоки перемикачів, виделки, підстави й опори терморезисторів, утримувані плавких запобіжників, тощо.



Рис. 1.1. Порцелянові ізолятори 1880-х років

1881 р. Порцелянові ізолятори що застосовувалися для електричних розподільних пристроїв та дверних дзвінків на батареях.

1885 р. Різноманітні порцелянові ізолятори.

Слід зазначити, що ще у 1900 р, у міжнародних технічних журналах Німеччини та США, широко обговорювалася новаторська для того часу

робота братів Ахіла і Луї Парвілей, присвячена резистивній кераміці. Запропонована технологія високотемпературних спікань порошків, яку вони розробили в Парижі, на вулиці Гаутами, 26 її після 1898 р. випробували на своєму новому заводі в Крамойсі (департамент Уаза у Франції), призвела до появи надзвичайно високотемпературних термостійких карбідокремнеївих електронагривальних елементів (опорів), таких як Silite (близько 1913 р.) і Global (близько 1926 р.)

У 1901 р. було створено перші індукційні реле струму, а також робляться перші кроки у виготовленні дистанційних реле. Незабаром разом з розвитком електричних систем, реле починають використовуватись також і для захисту.

У 1905 р. зростаюче використання порцеляни у сфері електротехніки, значно збільшило конкуренцію й вартість цих виробів різко впала. Особливо жорсткою була конкуренція між німецькими та австрійськими виробниками.

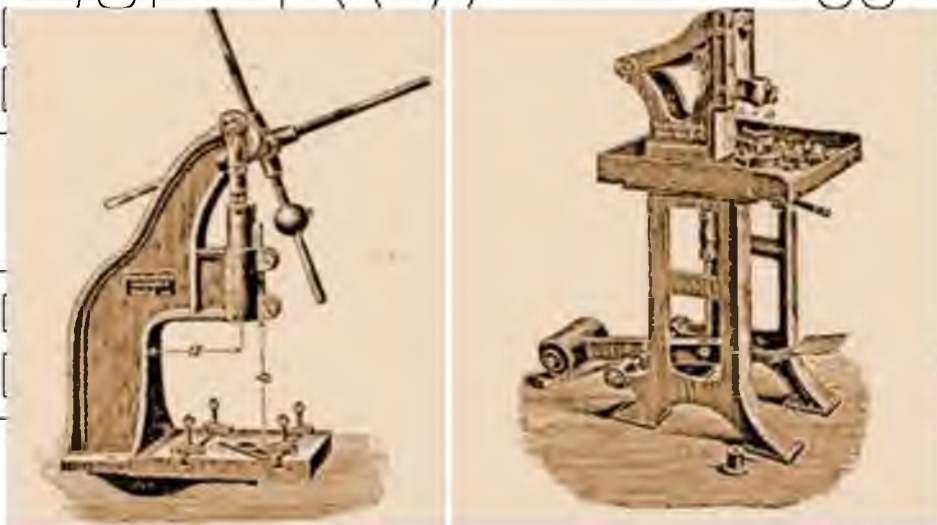


Рис. 1.2. Обладнання для виробництва електротехнічної порцеляни

Ручний німецький ударний прес для електротехнічної порцеляни 1905р. Музей Ultimheat.

Німецький прес з ножним приводом для електротехнічної порцеляни 1905р. Музей Ultimheat

У Німеччині дрібні електроізоляційні порцелянові вироби вироблялися із зволожений порошків, які спресовувалися ручним ударним або педальним пресом. У Франції ця технологія була винайдена в 1890 р. компанією Gauthier, що виробляє електротехнічний фарфор в м. Аржантьої, використовуючи для

цієї маси сталеві штампни. Виробничий процес полягав у отриманні грануляту, зволоженого сумішшю масла й води. 0,2-0,3 частини рослинного масла, 1,0-1,5 частини нафтового масла та 2-3 частини олійно-водяного розчину. Так до

100 частин пасти додавали лише 12- 17 частин цієї суміші. (Пізніше у технології уся суміш була замінена дизельним маслом.) Потім вологий порошок вручну протирали крізь сито. Необхідна кількість порошку викладалась у форм, де ущільнювалась ударними пресами. В більш кустарній версії, порцеляни, - вироби пресували, закриваючи форму та б'ючи її молотком. Після вилучення з форми, клемник залишали на декілька днів

просохнути, після чого покривали щільним шаром емалі та обпалювали. Загалом цей метод давав багато бракованих виробів. Внаслідок неоднорідності порошоків, нерівномірності кількості, поміщеного у форму

матеріалу, а також з причини нерівномірності прикладеного, за допомогою молоту, тиску - утворювалися тріщини, а порцеляна ставала пористою. З цих причин електрики того часу вважали, що фарфор був поганим ізолятором, а власне ізолюючим вважався тільки шар емалі. У 1902-1905 рр. ізоляційні характеристики електротехнічної порцеляни ще не були в повній мірі проаналізовані й вивчені.

У 1911 р була видана книга, на яку часто посилаються при виготовленні фарфорових електроізоляційних виробів: «Les substances isolantes et les méthodes d'isolement utilisées dans l'industrie électrique, by Jean Escard» (Погові

речовини та методи ізоляції, використовувані у електротехнічній промисловості, Жан Ескард). Й хоча автор вказує усереднені склади електротехнічної порцеляни, його данні про зміну питомого електричного опору в залежності від температури є фрагментарними та обмеженими, до того ж показують, що у розумінні конструкторів емаль була більш важливою для ізоляції, ніж склад порцеляни. Автор цього трактату присвячує лише 3

рядки використанню порцеляни в основі вимикачів, патронах для електричних лампочок та інших дрібних компонентах.



Рис. 1.3 1918р. Ізлятори та опалювальні прилади Parvillée

У 1919 р у Парижі, з ініціативи «Comptoir des fabricants de produits réfractaires», була створена лабораторія для випробування кераміки. У тому ж році виробник декоративної орцеляни з Ліможа Фредерік Легран об'єднав зусилля з Жаном Мондо, директором компанії Mondot, Vinatier and Jacquetty, яка з 1905 р виробляла в комуні Ексідей (департамент Дордонь, у Франції) електричні вимикачі з порцеляни для побутового освітлення. З цього об'єднання почав свою історію підрозділ електротехнічних виробів компанії Legrand.

У 1920-1930 рр., після розвитку електрифікації, почався значний ріст галузі електротехнічних запчастин, й багато інших виробників додали у свої каталоги клемні колодки з порцеляни: Moog, Fournet, Bouchery, Samet, Pétrier, Thomson та інші. Клемні колодки з порцеляни невеликих розмірів, іноді без кріпильних отворів, використовуються здебільшого для внутрішньої проводки освітлювальних мереж, замінюючи з'єднання, скріплені ізоляцією. У деяких з них передбачено два загисні гвинта під різні викруткі.

У грудні 1923 р Іври-Порт поблизу Парижа була урочисто відкрита лабораторія, призначена для випробування ізоляційної кераміки, здатна виробляти електричні розряди, що досягали мільйона вольтів.

У 20х р-р минулого сторіччя вперше друкувалися роботи з реле йного захисту на електромеханічній базі, а вже у 30х починалося значне

удосконалення таких реле. А вже у 50-х р-р в Америці існувало понад 50, а у СРСР близько 30 підприємств, що виготовляли реле різних типів.

Зараз терміном «реле» позначають велику та різноманітну групу автоматичних приладів, що використовуються у телемеханіці, релейному захисті та автоматизації. Само слово «реле» має англо-французьке походження від слова relais, що мало на увазі заміну втомлених коней на пошті й на момент свого винайдення використовувалося для посилення електричних сигналів до прийнятної рівня, що потребували тогочасні телеграфні апарати.

Матеріальну базу для винайдення таких реле створив досвід датського винахідника Х.Ерстеда, що зміг на практиці довести взаємодію електричних та магнетичних явищ. Розміщуючи понад магнітною стрілкою прямолінійний металевий провідник паралельний стрілці. При проходженні струму через провідник, стрілка поверталась майже перпендикулярно. В той же час Д.Ф. Араго з'ясував, що провідник, по якому протікає струм, набуває магнетичних властивостей.

У 1821 р М. Фарадей видає трактат «О деяких нових електромагнітних рухах й о теорії магнетизму», де показує як змусити намагнічену стрілку безперервно обертатися навколо одного з магнітних полюсів.

Наступним важливим кроком у появі сучасних захистних пристроїв стала запропонована А. Ампером система електромагнітного телеграфу, яка є предком сучасного реле. Запропонована ним система електромагнітного телеграфу була набором букв та цифр, що передавалися по окремих дротах, що реєструвалася за допомогою відхилень магнітної стрілки. Свій подальший розвиток система А. Амперу отримала у Росії, де у 1832 році академік П.Л.Шиллінг презентував свій телеграф до якого розробив спеціальний телеграфний код, де кожній літері алфавіту відповідала певна комбінація символів з чорних та білих кругів на телеграфному пристрої.

Зрозуміло, що першими регулярних збитків, від удару блискавкою, стали відчувати зв'язківці, а саме - телеграфні лінії. Такі дроти, розтягнуті по

безкрайніх полях на стовпах, регулярно доставляли до дорогого й тендітного тогочасного обладнання станцій короточасні сплески високої напруги. До того ж не тільки від ударів блискакви в самі дроти, але й навіть від ударів блискавок поряд з лінією! Отже вже тоді й довелося вигадувати засоби захисту обладнання від таких сплесків.

Коли, через десятиріччя свої дроти почали розтягувати на стовпах вже енергетики, для щойно впроваджуваного електричного освітлення, деякі напрацювання телеграфістів сталися у нагоді.

Спочатку розрядником був іскровий проміжок з пробивною напругою нижче, ніж рівень ізоляції обладнання, яке підлягало захисту.

Для захисту від грозових перенапруг ізоляції лінійних підстанцій, ділянок перетину ліній різної номінальної напруги, а також для захисту електрообладнання малопотужних підстанцій напругою 3-10 кВ

застосовувалися трубчасті розрядники, що виконувалися для напруги до 220

кВ. Пробій іскрових проміжків трубчастого розрядника при грозових перенапруженнях супроводжується проходженням струму промислової частоти, який гасився автоматично самим апаратом й відключення лінії не потребував.

Наступний етап - це вентиляний розрядник, у якому багаторазовий іскровий проміжок вмикався з послідовним нелінійним резистором у вигляді

окремих послідовних дисків, виготовлених на базі карбїду кремнію (SiC), із високотемпературним виналюванням у середовищі водню (H₂). Напруга на

цьому резисторі (залишкова напруга) при імпульсі струму 5-10 кА (8/20 мкс)

приймається рівним імпульсної пробивної напрузі іскрового проміжку, що й визначає рівень обмеження перенапруги.

Для робочого послідовного нелінійного резистора була розроблена нова безобжигова технологія виготовлення дисків (віліт). За розробку й

впровадження у серійне виробництво вітчизняних вілітових вентиляних

розрядників серії РВС на напругу до 220 кВ колективу ВЕІ та лєнінградського заводу «Пролетарій» було присвоєно звання лауреатів

Державної премії.

У 40-х роках на базі досліджень ВЕІ розробили багаторазовий іскровий проміжок, дугогасна здатність та стабільність пробивної напруги якого при предразрядному часі від 0,1 мкс до впливу напруги промислової частоти забезпечувалися оригінальною конструкцією одиничного іскрового проміжку (П) і шунтірувкою багаторазового П нелінійним резистором.

Подальше вдосконалення вентиляльних розрядників у напрямку поліпшення їх захисної дії в світовій та вітчизняній практиці проводилося шляхом підвищення дугогасної здатності П, що забезпечувало можливість збільшення супроводжуючого струму, та шляхом збільшення пропускної спроможності П та робочого опору (в основному збільшенням діаметра дисків), а також поліпшення нелінійності.

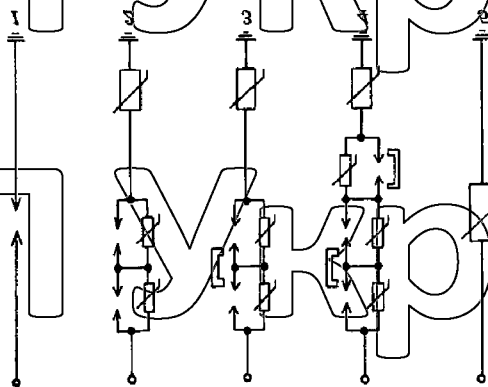


Рис. 1.4 Схеми апаратів для захисту від перенапруг, що характеризують етапи їх вдосконалення: 1 - координуючий іскровий проміжок; 2 - вентиляльний розрядник типу РВС; 3 - магнітно-вентильний розрядник типу РВМГ; 4 - магнітно-вентильний комбінований розрядник типу РВМК; 5 - безіскровий розрядник-обмежувач перенапруг нелінійний (ОПН)

У СРСР в 60-і р-р були досліджені принципи магнітного обертання й гасіння дуги супроводжуючого струму і розроблені конструкції вітчизняних магнітних іскрових проміжків, захищені авторськими свідоцтвами. На базі цих іскрових проміжків і віщових дисків збільшеного діаметру була розроблена серія магнітно-вентильних розрядників РВМГ на напругу до 500 кВ. Проектування далеких ЛЕП СВН виявило необхідність обмеження комутаційних перенапруг на кінцях лінії при можливих комутаціях, що призводило до тяжких по амплітудам і тривалості впливів на вентиляльні

розрядники. Це зумовило розробку нової серії магніто-вентильних розрядників типу РВМК, яка не мала аналогів за кордоном.

У середині 70-х р-р минулого сторіччя у СРСР та Японії було створено дослідні зразки захисних апаратів на базі варисторів з оксидно-цинкової кераміки. Коефіцієнт нелінійності ВАХ для таких варисторів (Varistor, від англ. Vari (able) (Resi) stor - змінне, змінюється опір) дозволяв їх використання для широкої області зміни струму, кращими за розповсюдженні в той час варистори з карбиду кремнію.

Використання таких оксидно-цинкових варисторів дозволило розробити більш досконалі захисні апарати без іскрових проміжків: при робочій напрузі струми через варистори вимірюються міліамперами, а при перенапруженнях досягають сотень і тисяч ампер. Такі апарати в СРСР отримали назву «нелінійних обмежувачів перенапруг» - ОПН, а за кордоном їх називали «метало-оксидними обмежувачами», привласнюючи їм різні фірмові назви та позначення.

Після підтвердження експлуатаційної надійності обмежувачів провідні фірми - виробники захисної апаратури приступили до згортання виробництва розрядників і їх заміні обмежувачами. Так, у 1983 р в Японії було повністю припинено виробництво розрядників, як і в Швеції, Швейцарії, США.

1.2 Загальні принципи роботи та сфери застосування нелінійних обмежувачів перенапруги

Широко освоєний зараз випуск нелінійних обмежувачів перенапруг у порцелянових покриттях обмежує сферу застосування ОПН через велику масу, труднощі зборки у підвісному виконанні, вибухонебезпечності й, наприкінці, можливості пошкодження порцелянових покриттів при транспортуванні, монтажі та у процесі застосування. Оксидно-цинкові обмежувачі в полімерних корпусах позбавлені цих недоліків. Значно легкіші, вибухобезпечні, високотехнологічні у виробництві, ОПН у полімерних корпусах можуть бути підвішені безпосередньо на лініях, встановлені на

висновках трансформаторів і електродвигунів, в осередках КРУ, а також між фазами для глибокого обмеження міжфазових перенапруг.

До того ж розробка високонелінійних резисторів на базі оксиду цинку ZnO стала базою для створення розрядника без іскрових проміжків, поименованого у вітчизняній практиці - обмежувачем перенапруг нелінійних (ОПН). Висока не лінійність, цього типу обмежувача, дозволяє залишати його увімкненим при найбільш допустимій напрузі - необмежено довго. При цьому рівень обмеження перенапруг визначається тільки його вольт-амперної характеристикою (ВАХ), охоплюючи й сферу можливих комутаційних перенапруг з меншими амплітудами струмів.

Слід підкреслити, що вентильні розрядники після поглинання енергії при перенапруженні повинні поглинати ще значну частину енергії при протіканні супроводжуючого струму, який в ОПН майже практично відсутній (у межах декількох міліампер).

Основними параметрами ОПН є:

- найбільше допустиме напруження ($U_{нд}$ або U_c по аббревіатурі МЭК 99-4) - це діюче значення напруги промислової частоти, яке допускається на ОПН необмежено довго та не призводить до втрати теплової рівноваги після поглинання енергії у процесі обмеження перенапруг й впливу підвищеної напруги протягом нормованого часу. Значення $U_{нд}$ у великій мірі залежить від можливої деградації (старіння) високонелінійних резисторів у процесі експлуатації;

- пропускна здатність ОПН - це здатність багаторазово (зазвичай 18-20 разів) поглинути енергію при обмеженні перенапруги без руйнування й зміни характеристик. Зрозуміло, що чим нижче рівень обмеження перенапруг, тим більше повинна бути пропускна здатність ОПН;

- залишаються напруги - це напруги на ОПН при впливі імпульсів струму різної амплітуди та форми, тобто вольт-амперні характеристики ОПН, які характеризують рівень обмеження перенапруг при імпульсних

впливах. Для грозових впливів приймаються імпульсні струми тривалістю 8/20 мкс, а для комутаційних - з фронтом 30 мкс й більше;

- допустимі напруги промислової частоти в залежності від часу їх застосування. ОПН, обмеживши імпульсні напруги й поглинувши певну енергію, може виявитися на деякий час під впливом напруги промислової частоти вище ніж $U_{нд}$ (наприклад, $1,4U_{нд}$ до відключення КЗ при ефективному заземленні нейтралі).

Здатність ОПН витримувати підвищені напруги промислової частоти задається в залежності від часу. Всі нормовані параметри ОПН підтверджуються відповідними випробуваннями, обсяг та методи яких визначені міжнародним стандартом МЕК 99-4.

Освоєння технології виробництва довготривалих високонелінійних резисторів типу МНР та конструкцій з полімерною ізоляцією (ВЕІ) дозволило забезпечити розробку й виробництво серії ОПН на класи напруги від 6 до 220 кВ, що відповідають міжнародному стандарту МЕК 99-4, та не поступаються світовим аналогам.

Серія РВМК, спеціально призначена для обмеження як грозових, так і важких режимів внутрішніх перенапруг, сприяла створенню вітчизняних ЛЕП з номінальними напругами 330, 500, 750 і 1150 кВ. Характеристики вентильних розрядників серій РВС, РВМГ та РВМК закріплені у ГОСТ 16357-83, й до цього часу ці вентильні розрядники забезпечують координацію ізоляції підстанцій СВН у нашій державі, та ще у ряді країн світу.

Останнім часом спостерігається істотний прорив у розробці нових конструкцій ОПН. Перш за все досягнута висока стабільність характеристик основного елементу ОПН-ОЦВ, а також істотно збільшена (та доведена до $900-1100 \text{ A/cm}^2$ при грозових імпульсах) допустима щільність струму через варістори. Такі характеристики ОЦВ при високому ступені нелінійності їх вольт-амперної характеристики забезпечують можливість значного зменшення розмірів та маси ОПН. Це, в свою чергу, дає можливість

створення ОПН в одноколонковому виконанні практично на всі класи напруги.

Сучасний апарат складається з колонки ОНВ, огорнутої у ізолюючий корпус зі склопластику з ребристим покриттям з кремнійорганічного каучуку та металевими фланцями на кінцівках.

Деякі виробники ОПН з полімерної ізоляції на напругу вище 110 кВ випускають апарати збірними з окремих модулів. Кожен модуль має висоту близько 1000 мм, повністю герметизований, транспортується та складається

окремо. Збірка ОПН з окремих модулів виробляється на місці інталації. При

цьому з'єднувальним елементом є циліндрична металева муфта з внутрішнім різьбленням, яка навертається на з'єднувальні накінечники окремих модулів.

Для забезпечення електричного з'єднання модулів передбачений розетковий контакт, ізольований від металевого накінечника. Тому струми

витоку з поверхні корпусів ОПН при зволоженні їх поверхні не потрапляють

у стовп варисторів, що небезпечно, в зв'язку з можливим перегрівом варисторів та передчасним виходом їх з ладу.

Однак модульна конструкція ОПН є промізкою й ненадійною при експлуатації, має низькі механічні характеристики при розтягувальних та

згинальних навантаженнях.

Технологія виробництва склопластикових циліндрів, отриманих шляхом намотування складроту на відповідній оправці й нанесення на них

захисного ребристого покриття, не обмежує довжину корпусу, що дозволяє

виготовляти ОПН у одноелементному виконанні без технологічних

обмежень по висоті. Така конструкція забезпечує мінімальну металосмість

та висоту ОПН й істотно підвищує надійність роботи апаратів при зволоженні забрудненої поверхні агрегату.

Висока механічна міцність склопластикового циліндра на розтягування

дозволяє виготовити ОПН-110 кВ й вище з товщиною стінки не більше 5-6

мм, товщина покриття з кремнійорганічної гуми - 5 мм. Малий діаметр корпусу визначає відносно низьку його вартість. Однак при опорному

виконанні ОПН 330 кВ і вище необхідно застосування ізоляційних відтяжок у трьох напрямках під кутом 120° для забезпечення стійкості конструкції під впливом розтягування дротів, вітрових та ожеледних навантажень.

Найбільш сприятливі умови для роботи ОПН із полімерною ізоляцією – в підвісному виконанні, коли склоплатстиковий корпус ОПН піддається впливу тільки розтягуючих зусиль, по відношенню до яких склопластикові корпуси мають великі запаси міцності.

Вирівнювання розподілу напруги уздовж стовпа варисторів при робочій нарузі для ОПН від 110 кВ й вище проводиться за допомогою горизонтальних екранів. Цей спосіб значно дешевше, ніж вирівнювання розподілу напруги за допомогою шпунтуючих колонок варисторів керамічних конденсаторів, що застосовуються у ряді конструкцій ОПН. Разом з тим він забезпечує значно більшу надійність роботи ОПН, оскільки повністю виключає використання конденсаторів, надійність роботи яких невисока.

Полімерна покриття дозволяє не тільки значно знизити вагу й габарити ОПН, але і значно полегшує умови роботи варисторів у ОПН, що в решті-решт значно підвищує надійність роботи ОПН. Справа в тому, що кремнійорганічна гума за своїми технологічними і міцностивими властивостями (як механічним, так і електричним) дозволяє створювати ребра малої товщини (близько 6 мм в основі та 2 мм на кінцях). Тому необхідну довжину шляху струму витoku можна забезпечити великою кількістю ребер з невеликим виловом.

При цьому підвищується ефективність використання довжини шляху струму витoku та значно зменшується напруга на підешеній міжреберній ділянці покриття. Це призводить до зменшення додаткових струмів зміщення, що протікають через варистори й викликають додатковий розігрів та прискорене старіння. Тому полімерні покриття мають значну перевагу ОПН у порівнянні із обмежувачами з порцеляновими покриттями. У зв'язку з цим не потрібно збільшення довжини шляху струму витoku ОПН із полімерними покриттями у порівнянні з рекомендованими для

високовольтного обладнання (як це прийнято для ОПН в порцелянових корпусах).

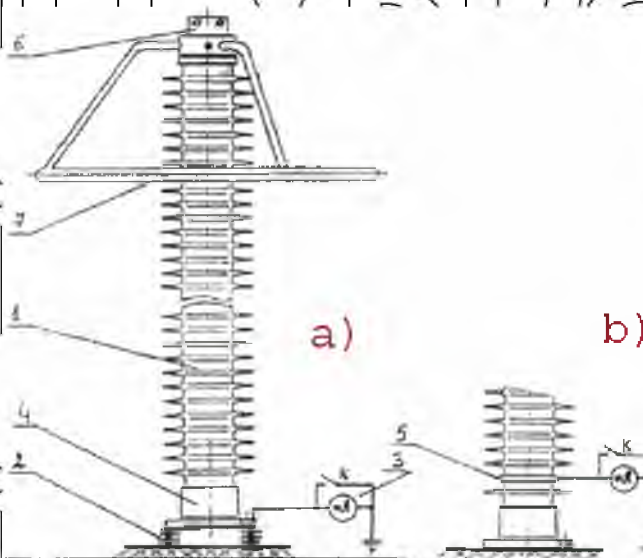


Рис. 1.5. Будова ОПН

1. ОПН; 2. ізоляційна підставка; 3. пристрій для вимірювання струмів провідності; 4. нижній фланець; 5. електрод; 6. верхній фланець; 7. екран.

1.3 Основні типи нелінійних обмежувачів

Як наводилося вище, конструктивно обмежувачі перенапруги складаються з колонки варисторів, захованих під ізоляційною оболонкою.

При цьому, виходячи з необхідних характеристик і конструкції пристрою таких колонок може бути кілька. Як оболонка зазвичай виступає склопластикова труба, яка здатна сприймати практично будь-який вид механічного навантаження, тим самим забезпечуючи необхідну міцність пристрою.

На цю трубу шляхом безшовного пресування вміщено трекінгостійку кремнійорганічну гуму, яка утворює зовнішню захисну оболонку з ребрами. Колонку варисторів з двох боків підтискають два виводи у вигляді фланців, які повернуті до труби з двох сторін. Для виготовлення використовується електротехнічний алюміній, стійкий до корозії.



Рис. 1.6. зовнішній вигляд різних типів ОПН

Щоб обмежувачі перенапруги ГНП добре виконували своє завдання, вони добре герметизовані. Здійснюється це надійним з'єднанням фланців, а також заповненням внутрішньої порожнини труби желеподібним кремнійорганічним (силіконовим) каучкуом.

На випадок внутрішнього пробоя в обмежувачі труби передбачені отвори, розташовані на певній відстані один від одного і закриті захисною оболонкою. Це дозволяє скинути внутрішній тиск пристрою без руйнування частини.

Нелінійні обмежувачі перенапруг умовно позначаються матеріалом зовнішньої ізоляції (Порцелянові ОПН, полімерні ОПН та т.ін), номінальною напругою мережі, максимальною розрахунковою робочою напругою мережі в точці установки захисного апарату, номінальним розрядним струмом грозових імпульсів, класом пропускної спроможності (клас розряду лінії, пропускна здатність в режимі обмеження) категорією розміщення апарату за ГОСТ 15150-69.

Так, наприклад, апарат ОПН-П - 35/40,5/10/2 УХЛ1, в системі прийнятих умовних позначень є: О - обмежувач, П - перенапруг, Н - нелінійний, П - полімерний обмежувач, 35 - призначений для роботи в мережі 35 Кв, 40,5 - розрахований на 40,5 кВ максимальної тривалої напруги, 10 - 10 кА імпульсного струму, 2 - 2 клас за пропускною спроможністю (дивись наведену далі таблицю), УХЛ1 - на кліматичні умови помірного та холодного

клімату та категорію розміщення 1 (для роботи на відкритому повітрі, 2 – для роботи у приміщенні) за ГОСТ 15150-69

Таблиця 1.1.

Класи пропускної спроможності ОПН

Класи пропускної спроможності	1	2	3	4	5
Пропускна спроможність, А	250-400	401-750	751-1100	1100-1600	1601-2100
Питома енергія, щонайменше кДж/кВ УНР	1,0	2,0	3,2	4,5	7,1

Крім того існують й такі типи обмежувачів перенапруги: клас А; клас В; клас С; клас D.

До класу А відносяться пристрої, які забезпечують захист від перенапруги, викликаного ударом блискавки в ЛЕП або об'єкт, що стоїть неподалік від неї. Здатні витримати імпульс напругою до 6 кВ та робочий опір трохи більше 10 Ом. Найчастіше монтаж обмежувачів проводиться зовні у місці з'єднання ЛЕП із кабелем.

Обмежувачі класу В встановлюються на ділянці введення кабелю безпосередньо до будинку. Вони є захистом від імпульсів номіналом 4 кВ.

Також вони є своєрідним 1 ступенем захисту об'єкта, оскільки передбачається, що обмежувач перенапруги ОПН попередньої категорії, вже встановлено, що є прерогативою компанії, яка обслуговує ЛЕП.

Все, що пропустив попередній захист, повинні скинути обмежувачі класу С у заземлення. Тільки вони можуть витримувати менше значення – лише до 2,5 кВ. Встановлюються вже всередині будинку в електрощитах і, як правило, працюють у парі.

Стандартні значення номінальних напруг обмежувачів нині такі: 0,2; 0,38; 3, 6, 10, 20 та 35 кА. Крім того, обмежувачі виготовляються на 0,54 1; 1,5; 2,0 та 2,5 кВ для захисту закордональних електродвигунів нафтовидобутку, а також на 15, 18, 20, 22, 24 та 27 кВ для захисту генераторів. Підприємствами – виробниками випускається ряд апаратів, які мають інші

нестандартні напруги (наприклад, для залізничного транспорту). Однак усі підприємства потові виробляти ОПН, як це заведено в рекомендаціях МЕК (міжнародні стандарти), на будь-які напруги до 3 кВ, через кожен кВ у діапазоні напруг від 3 до 30 кВ, через кожні 3 кВ – у діапазоні від 30 до 54 кВ.

Обмежувачі перенапруги поділяються залежно від:

- типу ізоляції (полімерна, порцелянова та ін.);
- конструктивного виконання (одноколонкові, багатоконкові);
- величини робочої напруги (6-10 кВ; 35кВ; 110кВ; 220кВ та ін);
- місця установки (ВРП чи ЗРП)



Рис. 1.7. зовнішній вигляд ОПН для ВЛ

Таблиця 1.2.

Різні типи ОПН з переліком їх основних характеристик

Тип обмежувача	Номінальна напруга кВ;	Обмеження перенапруг (однієї фази)	Висота обмежувача м	Маса обмежувача кг
ОПН-110	110	1,75	2,42	1,45
ОПН-150	150	1,75	2,35	2,0
ОПН-220	220	1,75	2,24	2,78
ОПН-330	330	1,75	2,36	4,15
ОПН-500	500	1,75	2,15	5,42

Н	У	Б	І	П	У	К	Р	А	І	Н	И
ОПН-750	750				1,75			2,10		9,30	
ОПН-750					1,75			2,10		8,29	
ОПН-1150					1,60			1,80		8,0	
ОПНО-1150					1,60			1,80		8,0	

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Таблиця 1.3.

Порівняння параметрів та характеристик ОПН

Параметр	ОПН-110- ПН-УХЛ1	ОПН-220- ПН-УХЛ1	ОПН-330- ПН-У1	ОПН-500- ПН-УХЛ1
Номинальна напруга, кВ Найбільше тривало	110	220	330	500
Допустима робоча напруга, кВ	73	146	210	303
Напруга на обмежувачі, допустиме в плині часу, кВ (не більше):				
20 хв	88	175	250	365
20 с	95	190	270	390
3,5 с	100	200	290	420
1,0 с	105	210	305	440
0,15 с	112	225	325	470
Номинальний розрядний струм. А	5000	5000	10 000	10 000
Розрахунковий струм комутаційних перенапруг, А	280	420	700	1200
Захисний рівень при обмеженні грозових перенапруг, кВ	250	460	700	920
Кратність обмеження грозових перенапруг	2,42	2,23	2,36	2,15
Захисний рівень при обмеженні комутаційних перенапруг, кВ	180	360	520	750
Кратність обмеження комутаційних перенапруг	1,74	1,74	1,75	1,75
Залишкова напруга, кВ (не більше), при імпульсах струму 8/20 мкс з максимальним значенням:				
3000 А	230	430	620	825
5000 А	250	460	650	860
10 000 А	280	500	700	920
Пропускна спроможність:				
20 імпульсів струму 1,2/2,5 мс з максимальним значенням, А	280	420	630	1200
20 імпульсів струму 8/20 мкс				
з максимальним значенням, А	5000	5000	10 000	10 000
2 імпульсу струму 4/10 мкс з максимальним значенням, А	–	–	65 000	65 000

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

2.1 Опис програми EMTP – сучасного інструменту для розрахунку електромагнітних перехідних процесів

Зараз існує безліч програм, що дозволяють моделювання майже будь яких електричних процесів EMTP-RV сучасне програмне забезпечення для моделювання та аналізу електричних систем у перехідних процесах. Ця універсальна система програмування розроблена для цифрового моделювання перехідних явищ електромеханічного та електромагнітного характеру. За допомогою цієї програми можуть моделюватися складні мережі та системи управління різної конструкції.

Перед моделюванням у реальному часі об'єкти великих енергосистем поділяють на підсистеми кожна з яких обчислюється одним процесом. В наш час розвиток науки відбувається прискореними темпами, впроваджуються нові інформаційні технології та комп'ютерна техніка. Це значно підвищує якість роботи, оскільки комп'ютер дозволяє поєднати теорію та практику.

Програма EMTP була розроблена Германом Деммелем понад сорок років тому за підтримки федеральної енергетичної компанії США (Bonneville Power Administration, США) та й по сьогодні продовжує вдосконалюватись.

У 1982 році федеральною енергетичною компанією США було прийнято рішення про комерціалізацію проекту та створена група з координації розробників, яка має назву EMTP Development Coordination Group.

Результатом плідної праці цієї групи комерційна програма DCG EMTP, сучасна версія якої і називається EMTP-RV. Деякі розробники не погодилися з новою моделлю розповсюдження програми, покинули в 1984 р. цей проєкт і почали розробку некомерційної версії EMTP – ATP (<http://www.emtp.org>).

Програма була повністю написана алгоритмічною мовою Фортран і

поширюється в декількох версіях, що відрізняються компілятором, що використовується: GNU Mingw32 або Watcom для Windows 95/98/NT/2000/XP/Vista; Salford для MS-DOS, MS-Windows 3. x/95/98; GNU Fortran для Linux.

DCG EMTP була представлена ринку у 1987 році, згодом допрацьована до версії 2.0 до середини 1989 року. Остання версія програми, відома як EMTP96, до виходу EMTP-RV, була найбільш досконалим у технічному плані програмним за стосунком для аналізу перехідних процесів та моделювання у різноманітних сферах.

У 2003 році DCG випустила нову, вдосконалену програму EMTP-RV, розроблену під технічним керівництвом Hydro-quebec. Ця версія програми стає найбільш зрозумілою та доступною для більшості користувачів, з'являються нові функціональні можливості й параметри, що забезпечують збільшену продуктивність та якість моделювання. EMTP-RV не є оновленням, це повна, більш досконала та сучасна заміна EMTP96.

Через особливості законодавства США в галузі авторських прав та взаємин розробників ATP із групою DCG EMTP відсутній вільний доступ до вихідних файлів кодів програмного комплексу. Тим не менш, програма є безкоштовною і в даний час всі бажаючі, на певних умовах, можуть отримати ліцензію на використання програми ATP безкоштовно. Існує кілька регіональних груп користувачів ATP-EMTP: у Північній та Південній Америці, Європі, Японії, Австралії, Кореї, Китаї, Південній Африці та Індії.

Українські користувачі можуть стати авторизованими користувачами, приєднавшись до Європейської групи користувачів, заповнивши форму ліцензійної угоди.

Базова версія призначена для вирішення широкого кола задач відомими методами та орієнтована про проектувальників. Комерційна версія містить унікальні моделі устаткування, не реалізовані у інших програмах.

Бібліотека містить велику кількість стандартних приладів електроенергетичних мереж в тому числі:

Моделі електромеханізмів;

Електричні машини, що обертаються (постійного і змінного струму, однофазні і багатofазні, синхронні та асинхронні).

- Моделі мереж та кабелів:

- лінійні R,L,C елементи та їх комбінації;

- лінії електропередачі та кабелі з розподіленими та частотнозалежними параметрами;

- нелінійні опори та нелінійні індуктивності, у тому числі з гістерезисом;

- Повноцінні моделі трансформаторів, що дозволяють моделювати насиченість гістерезису магнітного ядра, у тому числі ідеальні та насичені з гістерезисною характеристикою, однофазні та трифазні з різними схемами включення обмоток та конструкцій магнітопроводу;

- Комутаційні елементи з різними керуючими характеристиками;

- розрядники та варистори з керованим ступенем нелінійності;

- нелінійні ключові елементи (діоди, тиристори та диністори);

- Джерела енергії, у тому числі постійні, гармонійні та імпульсні широкого спектра характеристик;

Для вимірювання напруги та струму реалізовані амперметри, вольтметри та віртуальний осцилограф з необмеженою кількістю каналів.

Окрім того користувач може створити власні компоненти та модулі, за допомогою універсальної мови описів, такі як GPD (General-Purpose Description Language – універсальна мова описів), що підтримується численними моделюючими програмами, або Fortran-подібна мова.

Спеціалізація за стосунку EMTP-RV у сфері розробки електронної продукції для енергомереж забезпечує стабільність розвитку новаторських рішень з метою задоволення запитів користувачів та збереження лідерських засад як у технології, так і на ринку загалом.

Головний недолік ЕМТР-RV – інертність. Час, що спливає від ідеї до її втілення у програмі, вимірюється роками. Проте сам процес переобладнання будь якої організації, що працює у галузі електроенергетики, розрахований на декілька років. Відповідно на даному етапі необхідно тестувати як впроваджені у роботу прилади, так і ті, що вже працюють. Також до недоліків програми можна віднести англійськомовний інтерфейс.

Застосунок для розрахунку електромагнітних перехідних процесів ЕМТР-RV є зручним й достатньо потужним інструментом для аналізу явищ у електричних мережах будь якої степені складності. Незважаючи на вказані недоліки, модель може знайти практичне застосування у моделюванні перехідних процесів у електричних мережах.

При використанні програми АТР для розрахунку перехідних процесів в електричному ланцюзі необхідно створити структурований текстовий файл з описом параметрів елементів і з'єднань між ними, що входять у ланцюг, опцій чисельного методу і формату вихідних даних, які необхідно аналізувати після проведення розрахунку. Структура файлу містить певні поля для введення різної інформації. Сформований файл є файлом вихідних даних для головної програми, що здійснює чисельне інтегрування методом трапецій системи диференціальних рівнянь, складених для схеми заміщення електричного ланцюга.

На РИС.2.1а наведено приклад вхідного файлу для перехідного процесу в послідовному контурі RLC (РИС. 2.1б). Вирішення завдання здійснюється виконанням програми АТР-ЕМТР у режимі командної строки. Для перегляду результатів у графічному вигляді розробниками групи АТР створено низку програм (GTRPLOT, PlotXY, WPCPlot та інших.), що дозволяє як будувати графіки отриманих сигналів, а й проводити цифрову обробку даних. На рис.2.1в представлені результати розрахунку напруги на ємності, отримані за допомогою програми PlotXY.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C dT << Tmax >< Xopt >< Copt >
1.E-6 001
500 1 1 1 1 0 0 6 1 0 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B >< Leng><><>0
XX0002XX0003 10. 0 0
XX0003XX0004 1 1. 0 0
XX0004
/ SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose >< Top/Tde >< Ie >< Vf/CLOP >< type >
XX0001XX0002 -1. 1.E3 0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
11XX0001 0 100. -1 -1 1.E3
/OUTPUT
XX0004
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

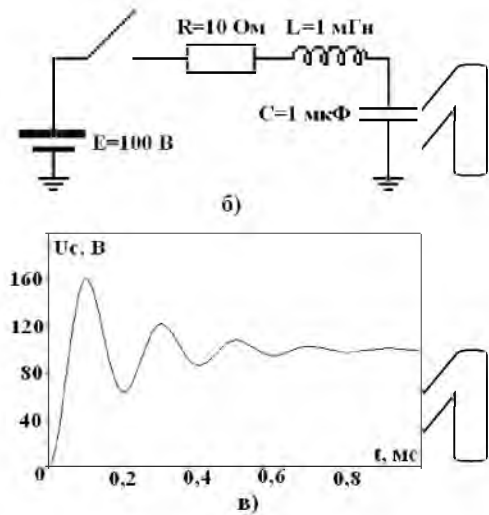


Рис. 2.1 Приклад файлу вихідних даних для АТР-ЕМТР

Вхідний файл містить інформацію про вузли схеми заміщення електричного ланцюга та елементи у гілках, включених між цими вузлами. Імена елементів відповідають символічним посиланням на бібліотеку елементів програми.

Створення файлу вхідних даних вимагає глибокого знання формальних правил і постійного контролю за коректністю даних, що є досить складним завданням для неспідготовованого користувача, що має на меті зосередити основну увагу на дослідженні характеру процесів в електричній мережі, а не на вивченні особливостей поведінки програми при допущених їм помилок.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА СКЛАДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ У
ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЕМТР

3.1

Опис розрахункової моделі

Вважаються такими, що можуть бути знехтувані та є дуже малими втрати в проводах і землі, вплив сусідніх фаз (ВРП змодельовано в однофазній постановці) та ефект корони на проводах ошиновування підстанції (корона на лінії також врахована).

Можливості програмного комплексу ЕМТР дозволяють моделювати ВРП у трифазній постановці, проте низка контрольних розрахунків свідчить про відсутність такої необхідності для вирішення практичних завдань.

Враховуючи те, що розрахунок грозових перенапруг в ВРП при відмові від обліку хвильового характеру процесів може призвести до суттєвих похибок, ділянки ошиновки, що з'єднують обладнання, прийняті однопровідними лініями без втрат заданої довжини і моделюються хвильовими параметрами - (хвильовим опором Z та швидкістю розповсюдження електромагнітної хвилі, яка приймається рівною $v = 300$ м/мкс). Хвильовий опір Z ошиновки визначається залежно від класу номінальної напруги ВРП.

Трансформатори та інші високовольтні апарати замінюються вхідними ємностями. Нелінійний обмежувач перенапруг моделюється нелінійним опором, вольтамперна характеристика якого задається виразом $U = AI^\alpha$.

Показник ступеня для аналізу грозових перенапруг приймається $\alpha = 0.08$, а коефіцієнт A визначається по одній відомій точці вольтамперної характеристики модельованого ОПН, в якості якої, як правило, використовується напруга, що залишається, на імпульсі струму 8/20 мкс з максимальним значенням 10 кА.

Імпульсний опір заземлення ОПН приймається рівним нулю. З'єднувальний шлейф між ОПН і ошиновкою ВРП моделюється

зосередженою індуктивністю, величина якої визначається довжиною шлейфу та його поточною індуктивністю (прийнята рівною 1 мкГн/м).

Вважається, що для ізоляції обладнання в експлуатації допустима дія грозового перенапруги з амплітудою не більше:

$$U_{\text{доп}} = 1.1(\sqrt{U_{\text{вип}}} \sqrt{0.5U_{\text{ном}}}),$$

Де $U_{\text{вип}}$ випробувальна напруга повного імпульсу грозового нового обладнання

$U_{\text{вип}}$ - Номінальна напруга обладнання.

Допустимі кратності грозових перенапруг вважаються однаковими незалежно від форми імпульсу грозової перенапруги на ізоляції обладнання.

3.2 Модель приєднаних до ВРП повітряних ліній

У кожному розрахунковому випадку удару блискавки всі приєднані до ВРП повітряні лінії поділені на дві групи:

- повітряні лінії, якими на ВРП не набігає грозових хвиль;
- повітряні лінії, з якої на ВРП набігає грозова хвиля, викликана розрядом блискавки у цю лінію.

Повітряні лінії, які стосуються першої групи, моделюються спрощено, тобто активними опорами, рівними хвильовому опорі фазного дроту.

Повітряна лінія, що відноситься до другої групи, докладно моделюється у трифазній постановці відповідно до своїх конструктивних властивостей.

При аналізі грозових перенапруг у ВРП 110-750 кВ розрахунковими випадками є такі дії блискавки на приєднані повітряні лінії:

1. Удари блискавки у грозозахисний трос ПЛ на підході до ПС. Всі удари блискавки у грозотрос умовно поділяють на удари у трос поблизу опори (точка 1 на рис.3.1) та удари у трос середній частині прольоту між двома сусідніми опорами (точка 2 на рис.3.1).

2. Прорив блискавки повз тросовий захист на фазні дроти для ліній з тросами (точка 3 на рис.3.1). Так як кут тросового захисту для ліній з тросами мінімальний у прольоті (трос натягнутий сильніше за дроти), то ймовірність прориву блискавки на фазний провід істотно вище поблизу опори. Тому надалі спрощено вважатимемо, що всі удари у фазний провід для ліній з тросами відбуваються поблизу опори.

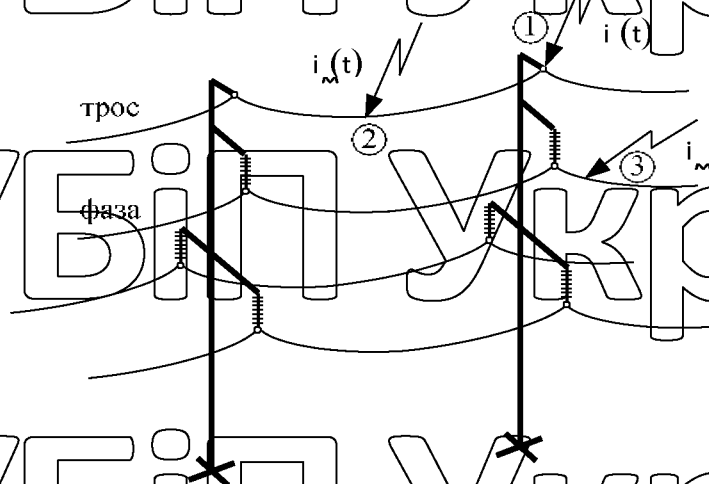


Рис. 3.1. Джерела грозових перенапруг на ізоляції ПЛ

Для ПЛ 110 кВ і вище з індуктованими перенапругами при ударах блискавки в землю можна не зважати.

Опора ПЛ. Всі опори моделюється ПЛ, приєднаної до ВРП, прийняті однаковими, відповідними типової конструкції проміжної опори, що найбільш широко застосовується для ПЛ класу номінального напруги.

Модель опори ПЛ представлена набором індуктивностей, величини яких визначені з використанням відомої геометрії опори та погонних індуктивностей опор (близько 0,5 - 1,0 мкГ/м) кожна опора заземлена через активний опір, що моделює заземлювальний пристрій.

Величина опору заземлення опор щоразу обмовляється окремо.

У нормативних документах та протоколах вимірювань, як правило, вказаний опір опор розтіканню струму, отримані методом "вольтметр-амперметр", однак для розрахунку грозових перенапруг потрібна величина

імпульсного опору опор. З деякою похибкою імпульсний опір заземлення опори можна прийняти рівним опору розтікання. Таке припущення можливе, оскільки з одного боку у імпульсному режимі через пробій ґрунтів при великих імпульсних струмах через опору коефіцієнт імпульсу стає менше одиниці, з іншого – у такому режимі позначається індуктивність променів заземлювача, що збільшує коефіцієнт імпульсу. Зрештою згадані чинники значною мірою взаємно компенсуються.

Фазні дроти та троси. Повітряна лінія представлена сукупністю розташованих між опорами ділянок ПЛ (прольотів). Кожна ділянка (проліт)

ПЛ моделюється багатопровідною лінією, що складається з фазних проводів та тросів, взаємне розташування яких визначається залежно від обраного типу опори з урахуванням довжини гірлянди ізоляторів.

Усереднені значення довжин прольоту для ПЛ 110, 220, 330, 500, 750 кВ становлять відповідно, 300 м, 350 м, 400 м, 450 м, 500 м.

Ізоляція ПЛ. Перекриття ізоляції ПЛ 110-750 кВ найімовірніше на опори, вздовж гірлянди ізоляторів, тобто там, де електрична міцність проміжку "провід-земля" ("провід-траверса") мінімальна. Можливість перекриття лінійної ізоляції при різних перенапругах, що впливають, визначається її міцністю, яка задається вольт-секундною характеристикою (ВСК).

При впливах, формою близьких до стандартного грозового імпульсу 1.2/50 мкс, вольт-секундна характеристика (в кВ) описується виразом:

$$u(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}},$$

де t – передрозрядний час (мкс), а коефіцієнти, K_1 і K_2 знаходяться по довжині гірлянди ізоляторів L (вираженої в метрах) як:

$$K_1 = 400 L$$

$$K_2 = 710 L$$

Як довжина гірлянди ізоляторів для ПЛ 110, 220, 330, 500, 750 кВ, можна використовувати, відповідно, усереднені значення.

$l = 1.25\text{ м}, D = 2.3\text{ м}, l = 3.0\text{ м}, L = 4.0\text{ м}, L = 6.0\text{ м}.$

Отримані за таких довжин вольт-секундні характеристики гірлянд ізоляторів ПЛ 110-750 кВ близькі до рекомендованих для них.

Імпульсна корона на проводах ПЛ, динамічна ємність одиночного коронуючого дроту описується емпіричною формулою:

$$C_d = C_0 \left[1 + \frac{5}{3} A (u^* - 1)^{2/3} \right],$$

Де u^* і $U_{нач}$ – миттєве значення напруга на дроті у відносних одиницях, $U_{нач}$ – початкова напруга загальної корони. A – емпіричний коефіцієнт, що залежить від полярності напруги на дроті

$$(A(+)) = 0.78, A(-) = 0.375.$$

Ємність C_0 – власна ємність некоронуючого дроту, яка може бути визначена через потенційний коефіцієнт

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{2h}{R_{экв}} \right],$$

$$C_0 = \frac{1}{\alpha},$$

$$R = \frac{D}{2} \sin \left(\frac{\pi}{n} \right)$$

$R_{экв} = (n \cdot r_0 \cdot R^{n-1})^{1/n}$ – еквівалентний радіус розщепленого дроту, n – число дротів у розщепленому стані, r_0 – радіус розщеплення дроту, D – крок розщеплення.

Початкова напруга загальної корони визначена виразом:

$$U_{\text{почат}} = 2\pi\epsilon_0 m_0 E_{\text{почат}} \cdot \frac{r_0 n}{k_m C},$$

де $m_0 = 0.82$ – коефіцієнт негладкості дроту (для крученого дроту); r_0 – радіус дроту; n – число дротів у фазі; C – середня ємність фази; $E_{\text{почат}} \approx 29 \approx 33 \approx 31$ кВ/см – початкова напруженість електричного поля, що відповідає появі корони; $k_m = 1 + (\epsilon - 1) \cdot r_0 / R$ – позначення співмножника формули, обумовленого розрахунком електростатичного поля розщепленого дроту.

Типові значення числа проводів у розщепленій фазі та радіуса r_0 складових, а результати розрахунків, виконаних при $h = 15$ м, $D = 0.4$ м, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Вихідні дані для розрахунку ємності коронуючого дроту ПЛ

$U_{\text{ном}}$, кВ	n	r_0 , см	$R_{\text{эв}}$, см	C_0 , пФ/м	$U_{\text{почат}}$, кВ
110	1	0.86	0.86	6.8	178
220	1	1.26	1.26	7.2	249
330	2	1.38	7.43	9.3	394
500	3	1.38	13.02	10.2	511
750	4	1.46	19.07	11.0	650

У програмному комплексі ЕМТР імпульсна корона на проводах ПЛ врахована за допомогою додаткових зосереджених ємностей (на додаток до власної розподіленої ємності C_0 між фазними проводами та землею фазного проводу), що включаються між фазними проводами та землею.

$$C_d - C_0 = C_0 \left[\frac{5}{3} A(u^* - 1)^{2/3} \right] = C_0 [1.667 A(u^* - 1)^{0.667}]$$

C_d -ЕМТР

Так як всі блискавки вважаються негативними, досить моделювати імпульсну корону тільки при негативній полярності напруги на фазному проводі.

У розрахунковій моделі EMTP зосереджені ємності, що моделюють імпульсну корону при негативній полярності напруги на фазному дроті, приєднані до фазних дротів ПЛ на відстані 1, один від одного; як вхідні параметри необхідно задавати клас напруги лінії $U_{ном}$ (кВ), довжину ділянки лінії l (м), для якої обчислюється ємність $C0l$. Далі, використовуючи клас напруги лінії $U_{ном}$ та дані табл програма EMTP визначає значення $C0$ та $U_{нач}$.

На кожному кроці розрахунку в EMTP у кожному j -му блоці, що моделює корону, з використанням ємності $C0l$ і миттєвого значення напруги $u^* = u / U_{почат}$, вимірюного на дроті в місці розміщення j -го блоку, здійснюється коригування враховує корону ємності (c^{EMTP}) $_j$.

У програмному комплексі EMTP - враховано вплив імпульсної корони лише на фронт поширюваних від місця удару блискавки у ПЛ грозових хвиль напруги негативної полярності, а викривлення «хвостової» частини імпульсу не враховано. Це досягнуто за рахунок підключення до фазних проводів динамічних ємностей (c^{EMTP}) $_j$, що моделюють корону, через діоди, які дозволяють протікати імпульсним струмам з негативно зарядженого фазного проводу в незаряджені підключені ємності, але виключають зворотний напрямок протікання струму.

НУБІП України

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ЕМТР

НУБІП України

4.1. Моделювання імпульсу струму блискавки

При вирішенні задач грозозахисту для моделювання струму блискавки часто використовується двоекспоненційний імпульс:

$$i(t) = \gamma \cdot I_{\max} [\exp(-at) - \exp(-bt)],$$

де a і b визначаються швидкостями наростання та спаду струму блискавки, γ - коригуючий фактор амплітуди струму блискавки.

Натурні осцилограми струмів блискавки часто свідчать про наявність нульової початкової похідної, в той час як двоекспоненційний імпульс - має похідну відмінну від нуля в початковий момент часу.

Тому в різних публікаціях запропоновано велику кількість, що забезпечують нульову початкову похідну функцій, що моделюють форму струму блискавки.

Наприклад, вираз, що часто зустрічається, що забезпечує нульову похідну.

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{\eta} x(t) \cdot y(t) = I_{\max} \cdot z(t) \cdot y(t),$$

Де хвилі

$$x(t) = \frac{(t/t_1)^n}{1 + (t/t_1)^n}, \quad y(t) = \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right),$$

n - параметр, що визначає крутість хвилі.

Опір каналу блискавки становить за різними оцінками величину $300 \div 1500 \text{ Ом}$.

Статистичний метод, який використовується для аналізу грозових перенапруг на устаткуванні. Удар блискавки у фазний провід ПЛ

призводить до виникнення грозової хвилі, яка, поширюючись обидві сторони від місця удару блискавки в лінію, набігає на ВРП.

Найбільшу небезпеку для обладнання ВРП становлять грозові хвилі напруги, що набігають, з великою крутістю фронту і великою амплітудою.

Амплітуда набігаючої хвилі, обмежена імпульсною міцністю ізоляції ПЛ, а крутість фронту - дією імпульсної корони на проводах. Враховуючи дію імпульсної корони, віддалені кілька кілометрів від входу ПС удари блискавки в приєднанні ПЛ не здатні викликати на ізоляції устаткування небезпечні

грозові перенапруги і, тому, найбільшу небезпеку устаткування ПС

представляють грозові хвилі, викликані близькими до ПС ударами блискавки, тобто. ударами у зоні «небезпечного» підходу.

Для зниження кількості ударів блискавки у фазні дроти на підходах до ПС, на приєднаних лініях встановлюються грозозахисні (блискавкозахисні) троси.

Удари блискавки в тросовий захист у ряді випадків можуть призводити до зворотного переркиття з тіла опори на фазні дроти. У таких випадках на фазних дротах утворюються хвилі високої крутості фронту, які можуть викликати на ізоляції обладнання ПС небезпечні грозові перенапруги.

Розроблена в ЕМТР модель для розрахунку грозових перенапруг на обладнанні ПС враховує статистичну природу параметрів імпульсу струму блискавки та віддаленості від ПС місця удару блискавки у ПЛ (у фазний провід, трос, опору):

1. Вибирається і-я лінія з Мпл приєднаних до ВРП повітряних ліній.
2. Задається розрахунковий випадок (удар блискавки в трос, опору, фазний провід).
3. Задається відстань x від місця удару блискавки до лінії до входу ПС.

4. Для вибраного випадку у докандій ЕМТР-моделі ПС багаторазово повторюється розрахунок грозових перенапруг на устаткуванні ВРП. У кожному з розрахунків параметри імпульсу струму блискавки

приймаються з урахуванням обраного для розрахунків закону розподілу параметрів струму блискавки.

5. Фіксується число грозових перенапруг на конкретному обладнанні ВРП (наприклад, на силовому трансформаторі) з максимальним значенням, що перевищує допустиме $U_{\text{доп}}$ - додаткове значення амплітуди грозових перенапруг для цього обладнання. Отримане число небезпечних перенапружень співвідноситься із загальним числом виконаних експериментів, що дає ймовірність появи небезпечних грозових перенапруг на конкретному обладнанні ВРП при ударах блискавки в i -у приєднану лінію: $P_{\text{пр}}^i(x)$, (при ударах у фазний провід), $P_{\text{опор}}^i(x)$, (при ударах у опору), $P_{\text{трос}}^i(x)$, (при ударах у трос).

6. На основі отриманих для i -ої приєднаної лінії залежностей $P_{\text{опор}}^i(x)$, приєднаної лінії залежностей $P_{\text{пр}}^i(x)$, $P_{\text{опор}}^i(x)$, $P_{\text{трос}}^i(x)$, приєднаної лінії залежностей, $I_{\text{небез}}$ захищеного тросами «небезпечного» підходу, за межами якого удари блискавки в цю ПЛ вже не викликають небезпечних грозових перенапруг на устаткуванні ВРП.

7. На основі інтегрування для i -ої приєднаної лінії $P_{\text{пр}}^i(x)$, $P_{\text{опор}}^i(x)$, $P_{\text{трос}}^i(x)$, отриманих за результатами розрахунків для кількох значень відстані x , визначаються усереднені по довжині.

$I_{\text{небез}}$ «небезпечного» підходу значення $P_{\text{пр}}(x)$, $P_{\text{опор}}(x)$, $P_{\text{трос}}(x)$, які є вихідними даними для проведення розрахунків річного числа небезпечних для ізоляції обладнання перенапруг n за формулою:

$$n = \frac{T_{\text{г}}}{100} \cdot \frac{N}{100} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{пл}}} \left[I_{\text{небез}}^i \cdot \left(n_{\text{пр}} \overline{P_{\text{пр}}^i} + n_{\text{опора}} \overline{P_{\text{опора}}^i} + n_{\text{трос}} \overline{P_{\text{трос}}^i} \right) \right], 1$$

де $T_{\text{г}}$ - число грозових годин на рік в районі розташування ПС, N - кількість ударів (на 100 км довжини й 100 грозових годин) блискавки в ПЛ на опорах конструкції, що розглядається, $n_{\text{пр}}$ - відносне число ударів

блискавки у фазний провід (ймовірність прориву блискавки на фазні дроти),
 $n_{\text{опор}}$ - відносна кількість ударів блискавки в опорі, $n_{\text{трос}}$ - відносне число
ударів блискавки в трос у середині прольоту.

Числові значення N , $n_{\text{пр}}$, $n_{\text{опор}}$, $n_{\text{трос}}$ - можуть бути визначені щодо
відповідних норм.

8. Визначається і порівнюється показник $M = 1/n$ тобто (1/років)
захищеності обладнання ВРП (наприклад, силового трансформатора) від
грозових перенапруг.

4.2 Розрахунок грозових перенапруг на підстанції
Розрахунки грозових перенапруг з використанням статистичного
методу проводяться для великої кількості ВРП 110-750 кВ і тут
проілюстровані на прикладі ВРП 500 кВ яка є типовою у своєму класі.

Розрахунок допустимих відстаней від обладнання до захисних апаратів
залежно від їхнього типу.
Схема ВРП 500 кВ наведена на рис.3.1. В ВРП встановлено 4 комплекти
захисних апаратів (у автотрансформаторів АТ-1,2,3 та на ПЛ).

Складена з урахуванням зазначених вище припущень розрахункова
ЕМТР схема ВРП 500 кВ підстанції наведена на рис.4.2: довжини ділянок
опинівки визначені за розмірною схемою для ВРП 500 кВ та вказані в метрах
на схемі рис.4.2; ємності автотрансформаторів - (АТ), вимірювальних
трансформаторів напруги електромагнітного - (ТН) та ємнісного типу -
(НДЕ), повітряних вимикачів - (ВВ), вимірювальних трансформаторів
струму - (ТТ), лінійних роз'єднувачів - (ЛР) прийняті усередненими для
обладнання 500 кВ.

Відомо, що прориви негативних блискавок на фазний провід у ПЛ 500
кВ найімовірніші при позитивній полярності напруги на дроті.

У схемі рис.4.2 спрощено не показано джерело напруги промислової
частоти, що задає напруга фазного дроту так, щоб на момент удару блискавки

у фазний провід воно відповідало амплітуді найбільшої робочої напруги мережі 500 кВ (428 кВ стандарт).

Даті при розрахунках грозових перенапруг в ВРП, спільно з приєднаною ПЛ у ряді випадків облік робочої напруги буде зроблено (див. схему рис.4.4).

У загальному випадку проведення розрахунків у схемі рис.4.2 можливе з урахуванням відмінності вольтамперних характеристик встановлених захисних апаратів, проте спрощено вважаємо, що всі чотири захисні апарати, показані на рис.4.1 та рис.4.2, мають близькі один одному вольтамперні характеристики в режимі обмеження грозових перенапруг.

Розрахунки проведені для значень напруги, що залишається на захисному апараті (імпульс 8/20 мкс амплітудою 10 кА): 900 кВ, 1050 кВ (позначено на рис.4.2), 1200 кВ.

Значення у 1200 кВ є близьким до захисного рівня розрядників РВМГ-500 і РВМК-500, а значення 1050 кВ і 900 кВ перекривають залишок діапазону напруг сучасних ОПН 500 кВ.

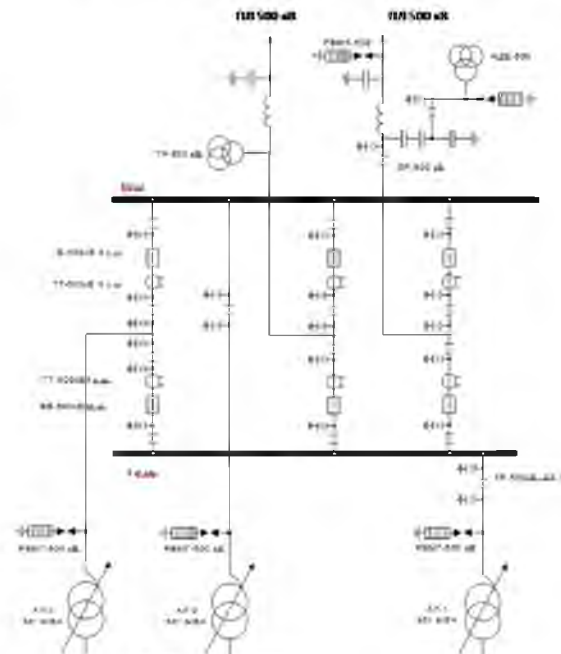


Рис.4.1 Схема ВРП 500 кВ ПС

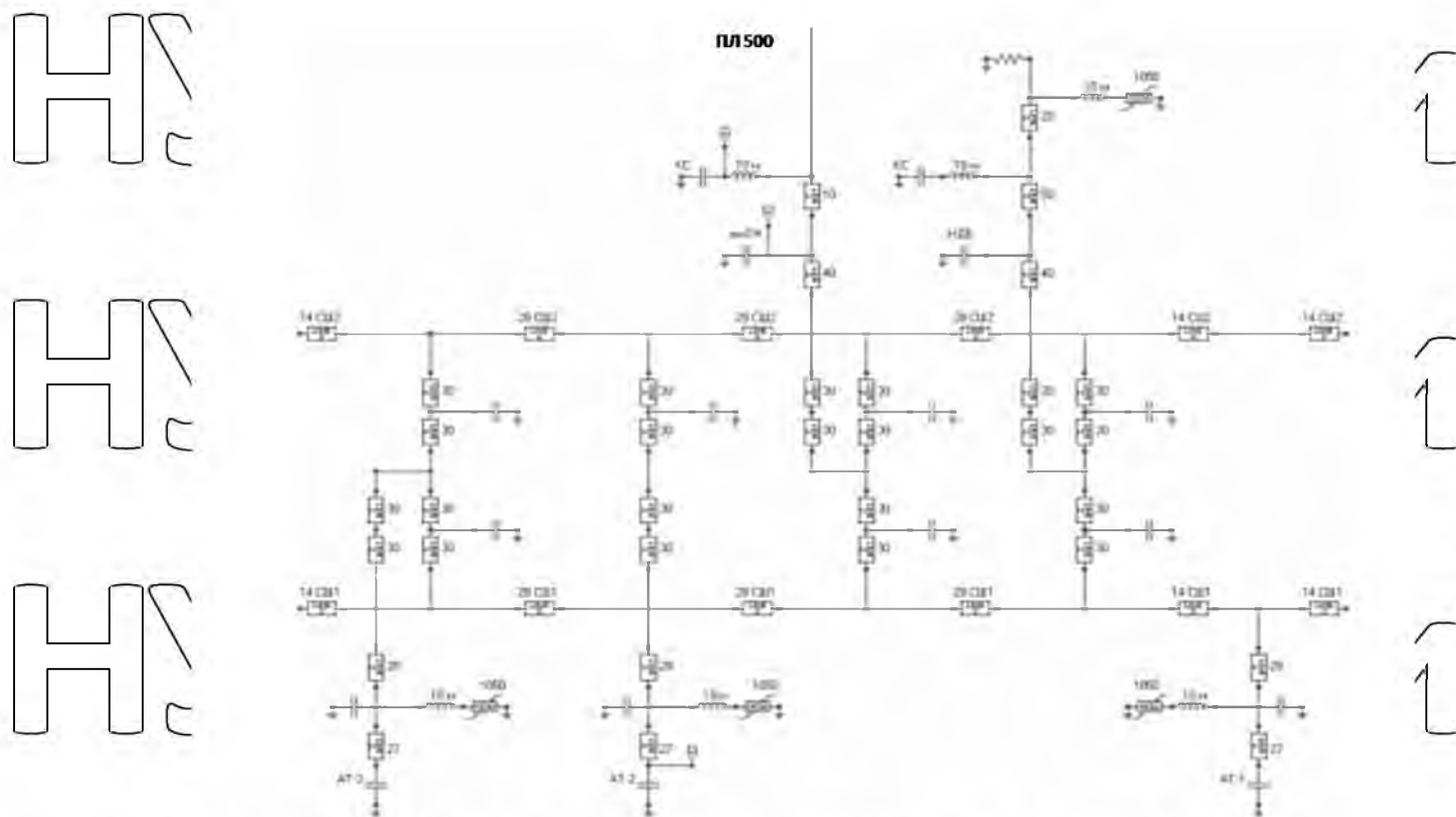


Рис.4.2 Розрахункова ЕМТP схема заміщення ВРП 500 кВ для розрахунку грозових перенапруг на устаткуванні при ударі блискавки у ПЛ 500 кВ

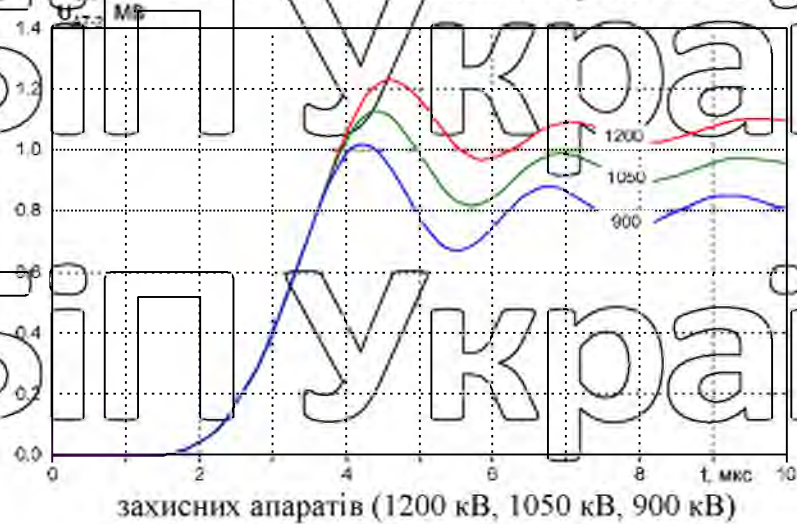
На рис.4.3-4.4 наведено розрахункові осцилограми перенапруг на стороні 500 кВ автотрансформатора АТ-2 та на вимірювальному ТН-500 кВ, встановленому на ПЛ 500 кВ, отримані у схемі рис.4.2 у разі, коли на ВРП 500 кВ по Б косокутній квіля напруги з амплітудою 2500 кВ та тривалістю фронту 1 мкс.

На рис.4.3 показано, що зі зниженням захисного рівня обмежувачів перенапруг (розрядників) максимальні перенапруги на АТ-2 знижуються.

На зниження перенапруг на АТ-2 в першу чергу впливає зниження напруги найближчого до нього захисного апарату і, враховуючи це, зниження напруги, що залишається захисного апарату у АТ-2 можна використовувати для збільшення відстані між АТ-2 і його захисним апаратом.

Отже, заміна вентиляних розрядників (насамперед, розрядника, встановленого у АТ) на сучасні ОПН дозволять збільшити допустимі відстані між АТ та його захисним апаратом.

Рис. 4.3 Перенапруги на АТ-2 залежно від захисного рівня всіх встановлених в ВРП



захисних апаратів (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ)

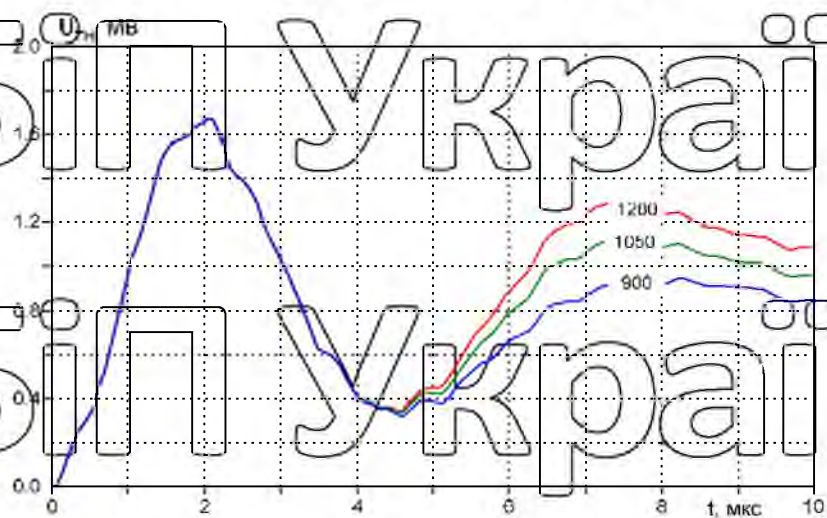


Рис. 4.4 Перенапруги на ТН залежно від захисного рівня всіх встановлених в ВРП захисних апаратів (1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ)

На рис. 4.4 показано, що із зменшенням захисного рівня захисних апаратів максимальні перенапруги на ТН не змінюються, а наявність захисних апаратів позначається після того, як максимум перенапруг на устаткування досягнуто. Отже, заміна навіть всіх вентиляційних розрядників в ВРП на сучасні ОПН не дозволяє збільшувати допустимі відстані до найбільш віддаленого обладнання ВРП.

Для того, щоб врахувати всі можливі поєднання параметрів грозових хвиль (фронт, амплітуда, наявність зрізу), що набігають на ВРП, розрахунки грозових перенапруг для ВРП 500 кВ/ПС проведені статистичним методом.

Нехай приєднані ПЛ 500 кВ виконані на проміжних залізобетонних опорах типу ПБ-500-1, зовнішній вигляд яких наведено на рис. 4.5.

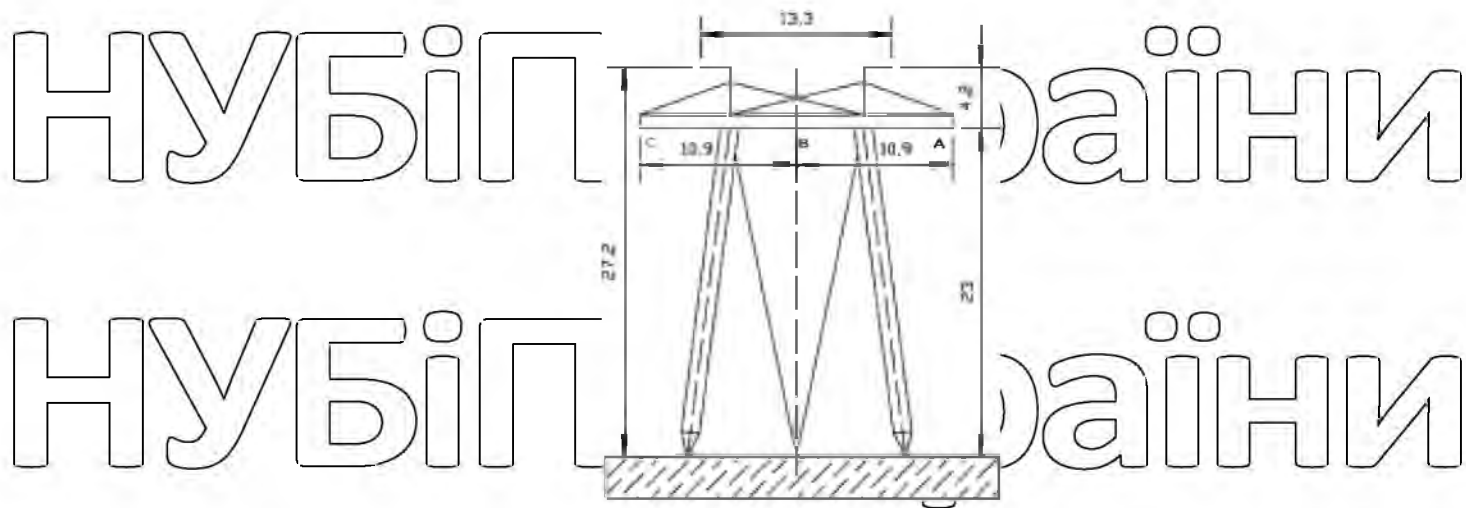


Рис.4.5 з/б опора ПЛ 500 кВ типу ПС-500-1

Прийmemo для ПЛ 500 кВ фазні проводи ЗАСО-400, радіус складової розщепленого проводу $r_0=1,38\text{см}$, кількість складовик $n=3$, крок розщеплення $D=40\text{см}$; марка троса С-70, радіус троса $r=0,55\text{см}$; розрахункова стріла дроту $f_{\text{др}}=10,4\text{м}$, розрахункова стріла провісу троса $f_{\text{пр}}=7,8\text{м}$; довжина прольоту 450м.

Чотири прольоти (кожен проліт розбитий на дві ділянки довжиною 225 м) ПЛ 500 кВ на опорах ПС-500-1.

Питомий опір ґрунту вздовж траси ПЛ 500 кВ прийнято $\rho=100\text{ Ом}^*$

м, а параметри ПЛ 500 кВ визначаються програмним комплексом ЕМТР з урахуванням частотних залежностей з урахуванням стріл провисання проводів та тросів у середині прольоту.

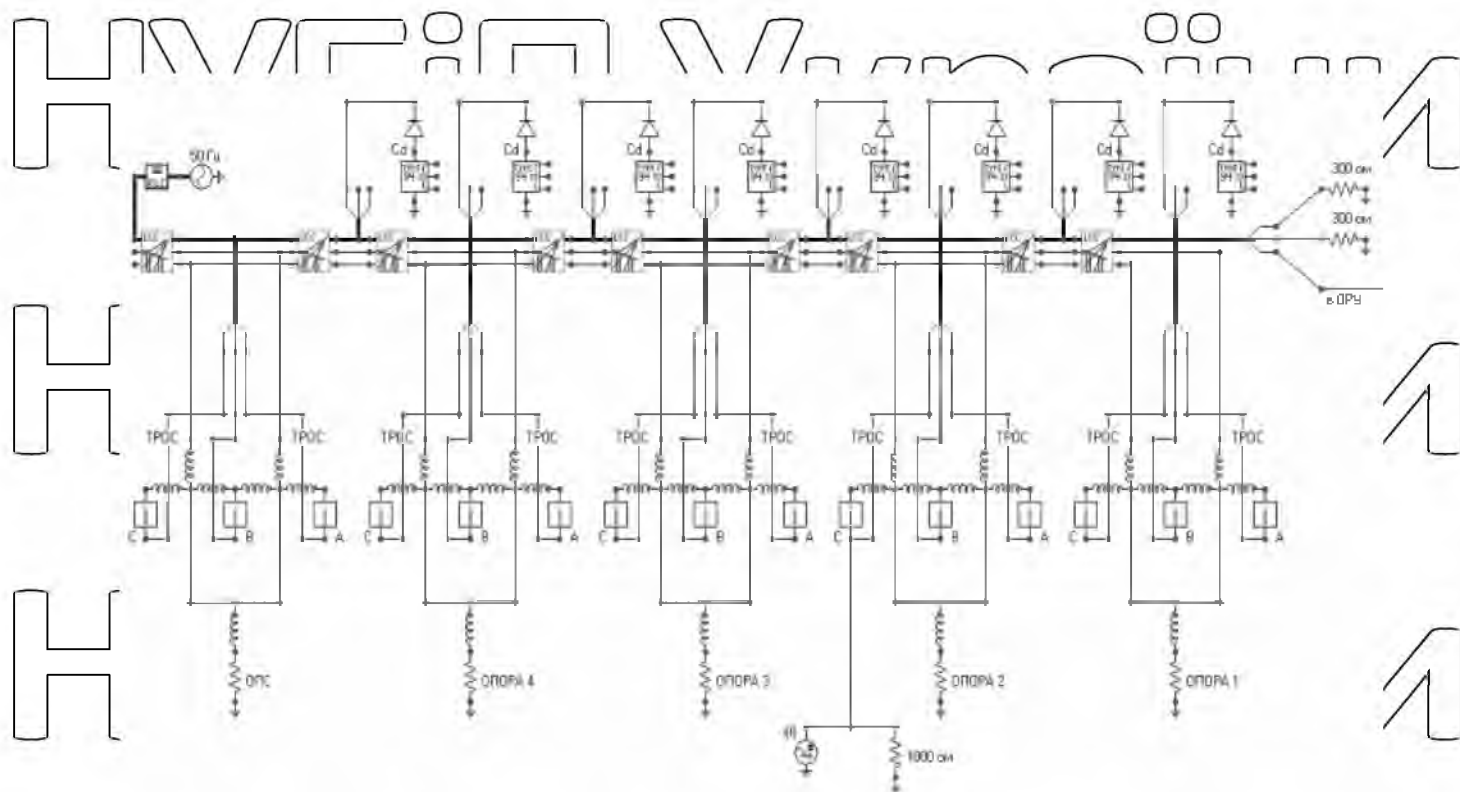


Рис.4.6 Розрахункова ЕМТР модель ПЛ 500 кВ, призначена для розрахунку грозових перенапруг на устаткуванні ВРП 500 кВ (схема рис.4.2) спільно з процесами в приєднаних лініях

1. З одного боку розглянутої ділянки, примикає «кінцева» довга ділянка ПЛ для неврахування відображень від протилежного по відношенню до ПС кінця ПЛ 500 кВ. З іншого боку до розглянутої ділянки, примикає однофазна схема ВРП 500 кВ ПС (рис.4.2), приєднана до одного з крайніх фазних проводів (оскільки прориви блискавки і зворотні перекриття для ПЛ 500 кВ на опорах ПБ-500-1 практично виключені на середній фазний провід), а два інших фазних проводи ПЛ 500 кВ заземлені через активний опір, що дорівнює хвильовому опору ошиновки ВРП 500 кВ, ($Z \approx 300 \text{ Ом}$).

2. По кінцях чотирьох прольотів ПЛ 500 кВ у схему введені моделі п'яти опор, що являють собою набір індуктивностей, величини яких визначені з використанням відомої геометрії опори (рис.4.5) та погонних індуктивностей порталних з/б опор (0.7 мкГн/м); кожна опора заземлена через активний опір, $R \approx 20 \text{ Ом}$, якщо інше не обумовлено.

3. На кожній опорі фазні дроти (умовно позначені «А, В, С») від траверси відокремлені гірляндами лінійних ізоляторів, які на схемі враховані

своїми вольт-секундними характеристиками (блоки вольт-секундних характеристик позначені «I» від англ. «Insulation» - ізоляція). У разі перевищення впливу на ізоляцію перенапруги значення, що визначається за вольт-секундною характеристикою, блок фіксує факт пробою ізоляції та з'єднує відповідний фазний провід з траверсою опори; блок запускається тільки у разі перевищення напруги на ізоляції мінімального значення U_0 прийнятого рівним 430 кВ (дещо більше амплітуди фазної найбільшої робочої напруги мережі 500 кВ). Довжина гірлянди $L_{iz} = 4.0$ м прийнята за розрахунковими даними.

4. Імпульсне джерело струму блискавки, що входить у місце удару (на схемі - це крайній фазний провід «3» на опорі №2). Форма струму задається імпульсом, у якого прийнято $\eta = 5$. Хвильовий опір каналу блискавки прийнято постійним і рівним $Z_M = 1000 \text{ Ом}$ у всьому діапазоні струмів. Розрахунки виконані для ймовірнісних розподілів параметрів струму блискавки, справедливих для першої компоненти негативної блискавки, і вважається, що амплітуда імпульсу, фронт і тривалість не залежить одне від одного. В ЕМТР імпульсне джерело струму може бути підключене до ПЛ (до фазного проводу або до троса) на будь-якій відстані x від входу ПС, проте спрощено далі враховані лише дискретні значення x , кратні довжині прольоту 450 м, тобто. розглядаються удари блискавки у трос і фазний дріт безпосередньо на опорі.

5. Блоки, що підключаються через діоди до ураженого блискавкою крайнього фазного проводу "С", що моделюють імпульсну корону на проводах. Блоки являють собою динамічну ємність коронуючого фазного дроту ПЛ 500 кВ на його ділянці довжиною 225 м (половина довжини прольоту), що визначається на основі миттєвого значення напруги.

Для ПЛ 500 кВ імпульсна міцність лінійної ізоляції досить велика, і тому зворотні перекриття при ударах блискавки у заземлені троси практично виключені при опорах заземлення опор менше 20 Ом, а розрахунковим

випадком для ПЛ 500 кВ при таких опорах заземлення є проти блискавки крізь тросовий захист на фазні дроти.

Для випадку удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на рис.4.7-4.9 як приклад наведено розподіл ймовірності появи перенапруг вище заданого значення (відкладається по осі абсцис) для АТ-2 і ТН, встановленого на ПЛ.

У статистичних розрахунках, що проводяться в ЕМТР, найбільш цікава координата по осі ймовірностей точки перетину розподілу максимальних значень грозових перенапруг на ізоляції обладнання з допустимими для цієї ізоляції значеннями.

Дослідження на моделі у застосунку ЕМТР показали, що для отримання цієї координати в більшості випадків достатньо провести лише низку експериментів, тому на рис.4.7-4.9 й надалі кожна з кривих отримана за результатами статистичних розрахунків перенапруг викликаних рядом ударів блискавки в аналізовану точку приєднаної до підстанції ПЛ, що відповідає мінімальній ймовірності $P = 0,001$ по осі ординат.

Допустимі рівні грозових перенапруг на ізоляції обладнання отримані та наведені у табл.4.1, але далі, аби не втратити спільності міркувань, візьмемо до уваги лише обладнання з повною ізоляцією (клас ізоляції «Б»),

для якого на рис.4.7-4.9 нанесені допустимі рівні грозових перенапруг: для вимірювальних ТН – $U_{\text{доп}} = 1568$ кВ; для АТ та НДІЕ – $U_{\text{доп}} = 1430$ кВ;

Представлені на рис.4.7-4.9 залежності були отримані в припущенні, що всі чотири комплекти захисних апарати, встановлених у ВРП 500 кВ, мають однакові вольтамперні характеристики: для рис.4.7-4.8 напруга, що залишається, на імпульсі 8/20 мкс амплітудою 10 кА кВ; для рис.4.9 напруга, що залишається, варіювалася (900, 1050, 1200 кВ).

Таблиця 4.1.

Випробувальні напруги повного грозового імпульсу обладнання класу 500 кВ за ГОСТ 1516.3-96 та допустимі грозові перенапруги, визначені за рекомендаціями

Обладнання	Напруга повного грозового імпульсу, кВ			
	Дослідницька		Припустиме	
	Клас ізоляції			
	«А»	«Б»	«А»	«Б»
Силкові трансформатори	1300	1550	1155	1430
Електромагнітні ТН	1425	1675	1293	1568
НДЦ, ТТ, апарати	1425	1550	1293	1430

З рис.4.7 видно вплив імпульсної корони на максимальні грозові перенапруги на обладнанні ВРП 500 кВ, облік якої призводить до суттєвого зниження ймовірності виникнення небезпечних перенапруг для всього обладнання ВРП, а особливо для найменш захищеного обладнання (електромагнітного трансформатора напруги ТН-500 на ПЦ) – Від значення $P = 0.26$ до $P = 0.057$, тобто. майже вп'ятеро.



Рис.4.7. Вплив імпульсної корони на максимальні грозові перенапруги на обладнанні ВРП 500 кВ (розглянуто удари блискавки у фазний провід ПЛЛ 500 кВ) на відстані 450 м від входу ПС (не враховується робоча напруга на проводах ПЛЛ та ВРП)



Рис. 4.8 Вплив робочої напруги позитивної полярності (+428 кВ) на максимальні грозові перенапруги на обладнанні ВРП 500 кВ (розглянуті удари негативної блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на відстані 450 м від входу ПС, врахована імпульсна корона на проводах)

На рис. 4.8 показано вплив початкової робочої напруги на проводах ПЛ

500 кВ та ВРП 500 кВ в мить удару блискавки (негативної полярності) у

прислухану до ПС лінію. Облік найбільш несприятливої величини робочої

напруги (для мережі 500 кВ це +428 кВ) призводить до збільшення ймовірності виникнення небезпечних перенапруг для всього обладнання

ВРП, а особливо для найменш захищеного обладнання (електромагнітного

трансформатора напруги ТН-500 на ПЛ – від значення $P = 0,057$ до $P = 0,08$,

тобто практично у півтора рази.

Наведений на рис. 4.9 розподіл ймовірностей появи максимальних грозових перенапруг на ізоляції АТ-2 (криві 3, 4, 5) та на ізоляції ТН-500 (криві

6, 7, 8), отримані при варіюванні вольтамперної характеристики захисних

апаратів, прийнятої однакою для всіх чотирьох апаратів, встановлених у

ВРП 500 кВ (на імпульсі струму 8/20 мкс з амплітудою 10 кА, напруга, що залишається, становить 1200 кВ, 1050 кВ, 900 кВ).

З рис. 4.9 видно, що зниження напруги захисних апаратів призводить до

зниження рівня максимальних грозових перенапруг на АТ, проте зниження

рівня максимальних грозових перенапруг на віддаленому від захисних апаратів обладнанні (на ТН-500 кВ практично не відбувається, тобто

надійність захисту від перенапруг віддаленого обладнання не змінюється.

На основі результатів розрахунків, проілюстрованих рис.4.9, а також осцилограмами рис.4.3-4.4, зроблено такі узагальнюючі висновки:

1. При зниженні напруги, що залишається, захисних апаратів, встановлених у ВРП, максимальні грозові перенапруги на устаткуванні

знижуються;

2. Ступінь зниження грозових перенапруг на устаткуванні (при заданому зниженні напруги, що залишається, захисних апаратів) залежить від віддаленості цього обладнання від захищеного устаткування;

3. Найбільше зниження перенапруг досягається для силових трансформаторів та автотрансформаторів, так як вони найближче розташовані до захисних апаратів;

4. Мінімальне зниження перенапруг властиво найбільш віддаленому від захисних апаратів устаткуванню ВРП.

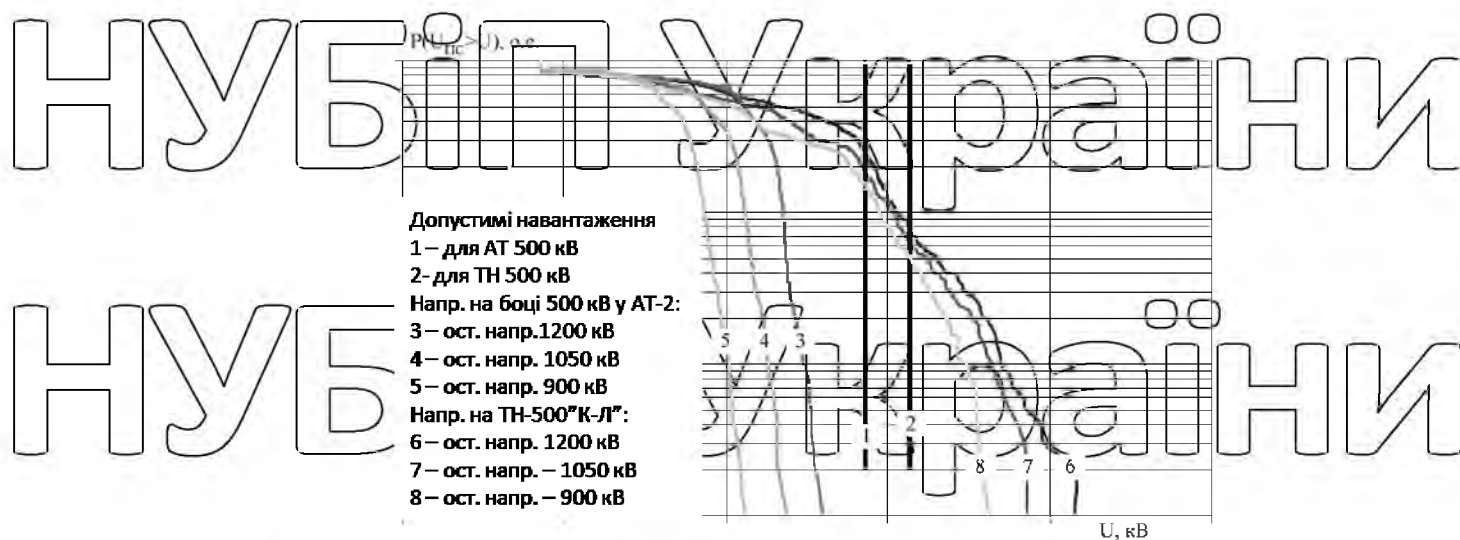


Рис.4.9 Вплив напруги захисних апаратів на максимальні грозові перенапруги на обладнанні ВРП 500 кВ (розглянуті удари негативної блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на відстані 450 м від входу ПС; враховано виникнення імпульсної корони на проводах ПЛ і дротів В4 ВРП)

4.3 Розрахунок необхідної довжини тросового підходу ПЛ

Розрахунки грозових перенапруг (рис.4.9) показали, що найменш захищеним обладнанням ВРП 500 кВ при ударах блискавки ПЛ 500 кВ є вимірювальний трансформатор ТН-500. Аналогічно наведеним на рис.4.9

результатам можна показати, що при ударах блискавки ПЛ 500 кВ найменш захищеним обладнанням ВРП 500 кВ є вимірювальний трансформатор ємнісного типу НДЕ-500.

Вплив віддаленості місця удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на найменш захищеному устаткуванні ВРП 500 кВ відображено на рис.4.10 (удар у ПЛ 500 кВ) та рис.4.11 (удар блискавки у ПЛ 500 кВ).

При отриманні рис.4.10-4.11 було прийнято, що усі чотири комплекти захисних апаратів, встановлених у ВРП 500 кВ, мають однакові вольтамперні характеристики (напруга, що залишається, на імпульсі 8/20 мкс амплітудою 10 кА становить 1200 кВ).

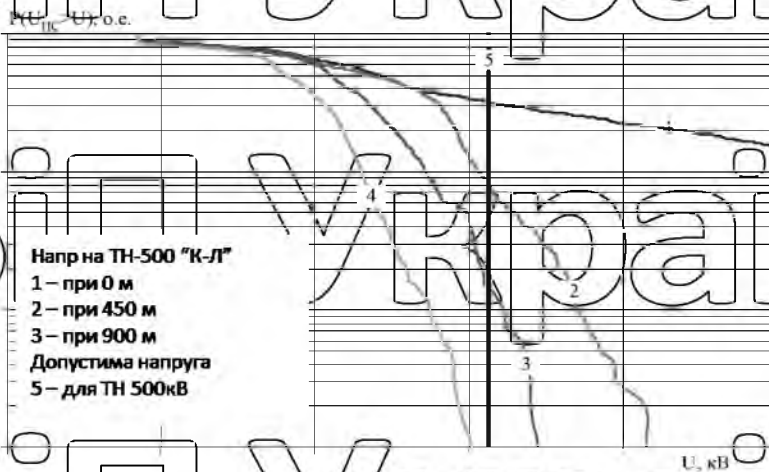


Рис.4.10. Вплив віддаленості від входу ПС, місця удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на ізоляції ТН-500 (враховано імпульсну корону на проводах ПЛ; враховано робочу напругу +428 кВ на проводах ПЛ та ВРП)

На рис.4.10-4.11 показано, що максимальні грозові перенапруги на устаткуванні ВРП 500 кВ виникають при найбільш близьких до ПС ударах блискавки в приєднанні ПЛ 500 кВ. Зі збільшенням відстані від місця удару блискавки у ПЛ 500 кВ до ПС максимальні грозові перенапруги на

обладнанні ВРП 500 кВ знижуються, що відповідає зменшенню ймовірності появи небезпечної для ізоляції грозової перенапруги.

У розрахунковій моделі при ударах блискавки ПЛ 500 кВ (рис.4.10) з відривом понад 1350 м від входу ПС, грозові перенапруги на найменш захищеному обладнанні ВРП 500 кВ не перевищили допустимого для ізоляції рівня жодного разу.

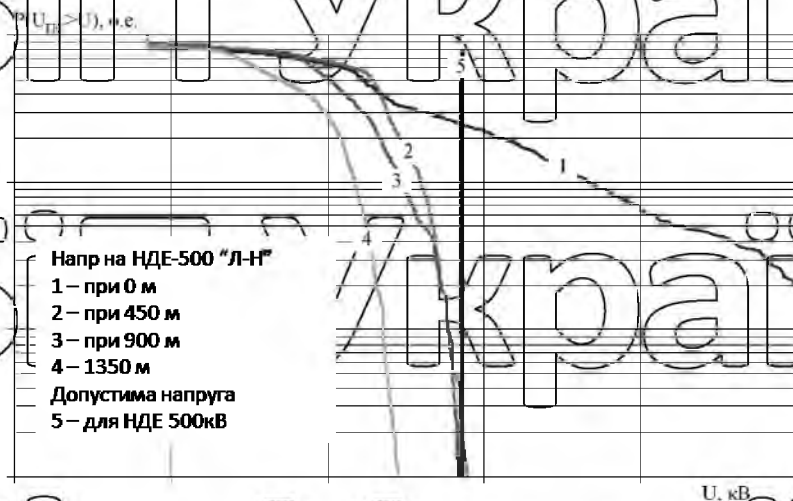


Рис. 4.11 Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на ізоляції НДЕ-500 (враховано імпульсну корону на проводах ПЛ; враховано робочу напругу +428 кВ на провідках ПЛ та ВРП)

Проведені розрахунки, проілюстровані рис.4.10-4.11 з прикладу ВРП 500 кВ, дозволяють зробити такі висновки:

1. Найбільшу небезпеку для обладнання ВРП становлять грозові перенапруги, викликані ударами блискавки у фазні дроти приєднаних ПЛ на відстані не більше 500-1500 м від ПС (довжина так званого небезпечного підходу);
2. Удари блискавки у фазні дроти ПЛ на відстані понад 500-1500 м практично не здатні викликати небезпечних грозових перенапруг на обладнанні ВРП;
3. Для зниження числа прямих ударів блискавки у фазні дроти, отже й числа небезпечних грозових перенапруг на устаткуванні ВРП, на довжині

«небезпечного» підходу ПЛ до ПС необхідне встановлення тросового захисту;

4. Збільшення довжини тросового підходу ПЛ до ПС понад довжину «небезпечного» підходу, не змінює (не підвищує) захищеності обладнання ПС від грозових перенапруг;

5. Найменша довжина «небезпечного» підходу ПЛ до ПС необхідна на тих приєднаних ПЛ, у лінійних осередках яких встановлені захисні апарати (розрядники або ОПН); на підходах таких ПЛ припустимо не встановлювати трос, оскільки ОПН лінійного осередку перебирає на себе виконання ролі троса зі зменшення кількості небезпечних хвиль, які проходять до підстанції.

Каскадні схеми захисту обладнання та їх ефективність.

На рис.4.12 залежно від віддаленості місця удару блискавки у ПЛ 500 кВ показано зміну ймовірності перевищення грозовими перенапругами допустимого для ізоляції рівня (криві 1 та 3, наведені на рис.4.12, отримані з використанням даних рис.4.10 та рис.4.11 відповідно).

Відповідно до ВРП 500кВ можуть бути виключені доданки від зворотних перекриттів на приєднаних ПЛ.

500кВ (при опорах заземлення з/б опор менше 20 Ом), оцінка захищеності обладнання ВРП 500 кВ від грозових перенапруг при ударах у фазні проводи ПЛ 500 кВ пропорційна площі $P_{тр}$ ($i=1,2$) під кривими на рис.4.12, а найбільша буде у того обладнання, для якого площа, що розглядається, мінімальна.

Площі під кривими 1-4 (рис.4.12) наведено у табл.4.2

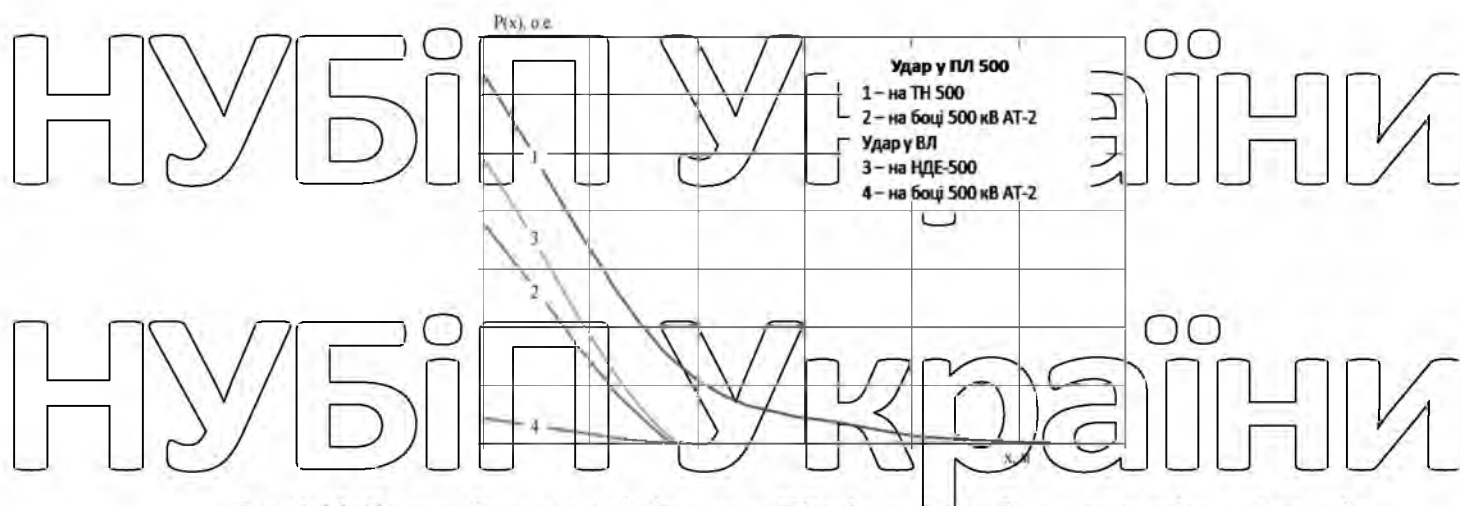


Рис.4.12. Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки у фазний провід приєднаних ПЛ 500 кВ на максимаьльні грозові перенапруги на ізоляції обладнання ВРП 500 кВ (враховано імпульсну корону на проводах ПЛ; враховано робочу напругу +428 кВ на проводах ПЛ та ВРП)

Таблиця 4.2.

Площа (о.е._x м) під кривими 1-4 (рис.4.12)

номер кривої по рис.4.12	удар блискавки у фазний провід	Обладнання ВРП 500 кВ	Площа під кривою
1	ПЛ 500 кВ	ТН-500	10
2		АТ-2	43
3	ПЛ 500 кВ	НДЕ-500	55
4		АТ-2	5

На основі аналізу табл.4.2 та рис.4.12 можна стверджувати, що:

1. Найменш захищеним обладнанням ВРП є обладнання лінійних осередків приєднаних ПЛ (за відсутності в них захисних апаратів);
2. Наявність у лінійному осередку приєднаної ПЛ захисного апарату (розрядника або ОПН) підвищує захищеність від грозових перенапруг встановленого у ньому обладнання (для ВРП 500 кВ ПС в 2 рази згідно з табл.4.2);
3. Наявність у лінійному осередку приєднаної ПЛ захисного апарату істотно підвищує захищеність встановлених на ПС силових трансформаторів та автотрансформаторів від грозових перенапруг, викликаних ударами блискавки в цю ПЛ (для ВРП 500 кВ ПС у 8-9 разів);

4. Найбільш захищеним від грозових перенапруг буде обладнання того ВРП, у якому в лінійних осередках приєднаних ПЛ встановлені захисні апарати; у таких ВРП практично виключені пошкодження ізоляції силових трансформаторів і автотрансформаторів від грозових перенапруг, викликаних грозовими хвилями, що набігають з приєднаних ПЛ.

Схема рис.4.13 захисту обладнання ВРП від грозових перенапруг, коли по ходу грозової хвилі, що набігає з ПЛ, послідовно встановлені два захисні апарати (один – у лінійному осередку або на збірних шинах, другий – у трансформатора або автотрансформатора), називається «каскадною» і, як показали дослідження, є дуже ефективною для захисту обладнання від грозових перенапруг та особливо ефективною при $L_1 \ll L_2$.

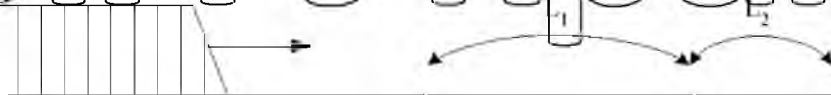


Рис.4.13. Каскадна схема захисту обладнання ВРП від грозових перенапруг, викликаних грозовими хвилями, що набігають з ПЛ

4.4 Облік зворотних перекриттів на приєднаних ПЛ
Удари блискавки в заземлені тропи ПЛ 500 кВ не призводять до зворотного перекриття з опори на фазні проводи при опорах заземлення з/б опор менших за 20 Ом.

Як правило, на підходах ПЛ до ПС прагнуть забезпечити опори заземлення опор ПЛ, що не перевищують 10-20 Ом, проте відомі випадки, коли не вдається забезпечити низьких опор в заземлення з/б опор ПЛ на підходах ПС.

У таких випадках при розрахунках грозових перенапруг на обладнанні ВРП, викликаних ударами в приєднані ПЛ, необхідно враховувати зворотні перекриття на фазні дроти на підходах до ПС.

Удари блискавки в трос у середній частині прольоту ПЛ можуть призводити до зворотних перекриттів на опорі з помітно меншою ймовірністю, ніж при ударах блискавки у опору або трос поблизу неї. Тому далі спрощено не розглянуті удари блискавки в трос у середній частині прольоту, а вся увага зосереджена на ударах блискавки безпосередньо в опору (віддаленість x місця удару блискавки у ПЛ від входу ПС кратна довжині прольоту).

Аналогічно випадків удару блискавки у фазний провід на рис.4.14 (удар у ПЛ 500 кВ) та рис.4.15 (удар блискавки у ПЛ 500 кВ №2) розглянуто вплив віддаленості місця удару блискавки в опору ПЛ 500 кВ, на максимальні грозові перенапруги на найменше захищеному устаткуванні ВРП 500 кВ.

При отриманні рис.4.14-4.15 було прийнято, що всі чотири комплекти захисних апаратів, встановлених у ВРП 500 кВ, мають однакові вольтамперні характеристики (напруга, що залишається, на імпульсі 8/20 мкс амплітудою 10 кА становить 1200 кВ), а опір заземлення всіх опор ПЛ на відміну від раніше розглянутих випадків, становить $R = 50 \text{ Ом}$.

На рис.4.16 залежно від віддаленості місця удару блискавки в опору ПЛ 500 кВ показано зміну ймовірності перевищення грозовими перенапругами допустимого для ізоляції рівня (криві 1 та 3, наведені на рис.4.16, отримані з використанням даних рис.4.14 та рис. 4.15 відповідно). Площі під кривими 1-4 (рис.4.16) наведено у табл.4.3.

Таблиця 4.3.

Площа (о.е. \times м) під кривими 1-4 (рис.4.16)

номер кривої по рис.4.16	удар блискавки у трос на з/б опорі	обладнання ВРП 500 кВ	площа під кривою
1	ПЛ 500 кВ	ТН-500	34
2		АТ-2	10
3	ПЛ 500 кВ	НДЕ-500	22
4		АТ-2	

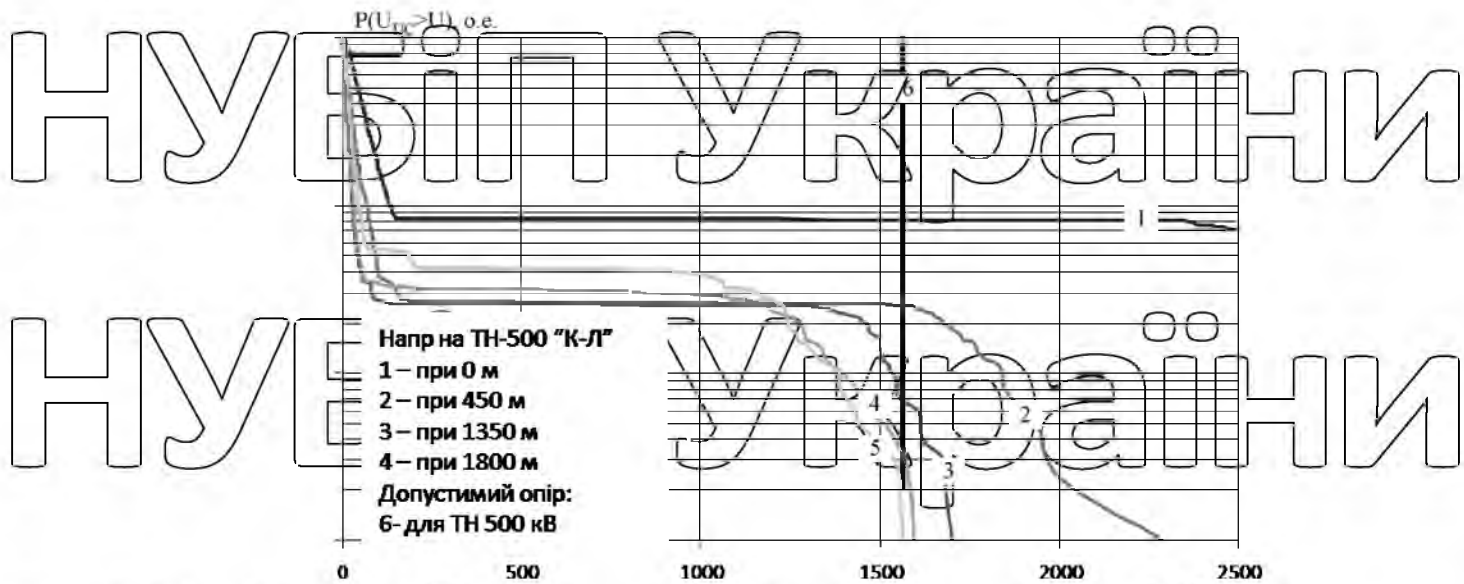


Рис.4.14 Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки у опору ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на ізоляції ТН-500 (врахована імпульсна корона на проводах ПЛ; робоча напруга на проводах ПЛ та ВРП не враховано; $R = 50 \text{ Ом}$)

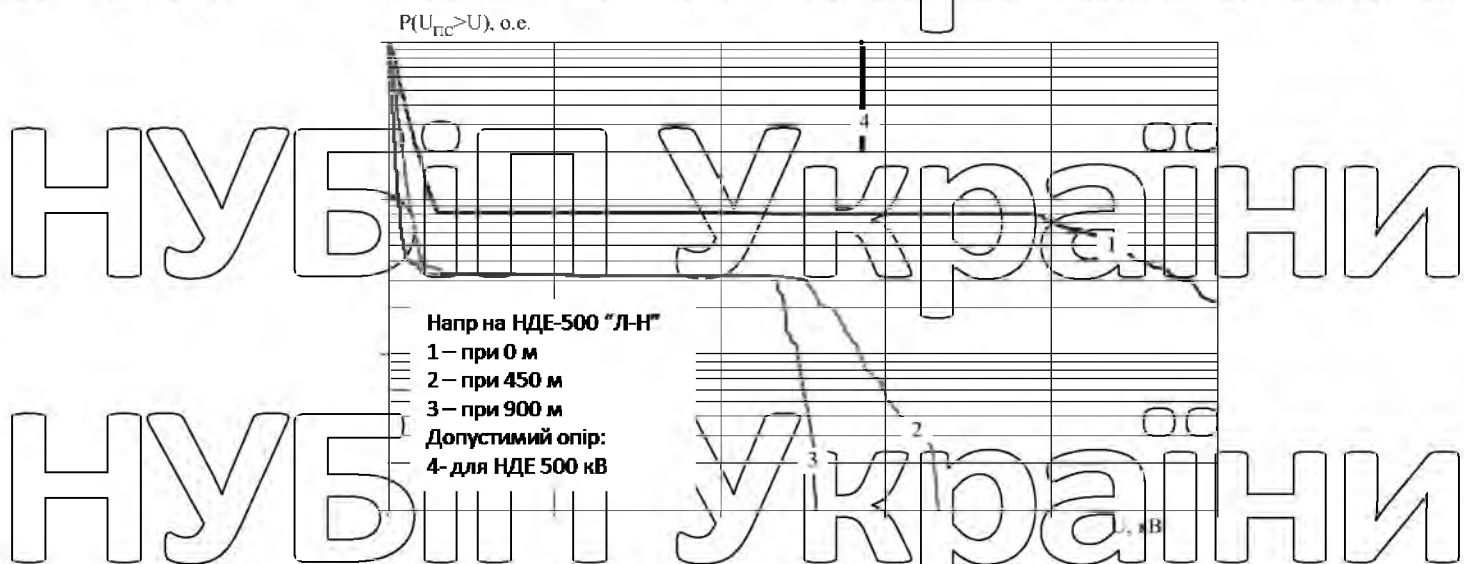


Рис.4.15 Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки в опору ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на ізоляції НДЕ-500 (врахована імпульсна корона на проводах ПЛ; робоча напруга на проводах ПЛ та ВРП не враховано; $R = 50 \text{ Ом}$)

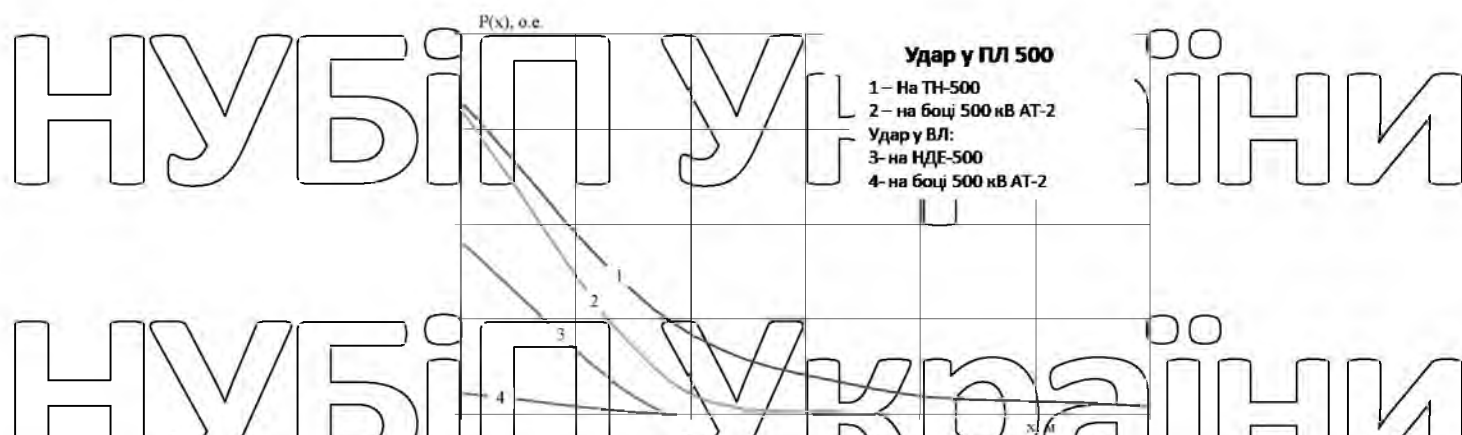


Рис.4.16. Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки у з/б опору приєднаних ПЛ 500 кВ на максимальні грозові перенапруги на ізоляції обладнання ВРП 500 кВ (врахована імпульсна корона на проводах ПЛ; робоча напруга на проводах ПЛ та ВРП не враховано $R=50$ Ом)

На основі аналізу табл.4.3 та рис.4.16, враховуючи дані, що свідчать про суттєвий вплив опору заземлення опор різної конструкції на кількість зворотних перекриттів при ударах блискавки опори та троси, зроблено такі висновки (на додаток до висновків на основі табл.4.2.):

1. Число грозових хвиль, що набігають на ВРП викликаних ударами блискавки в опори та троси приєднаних ПЛ, істотно залежить від опору заземлення опор на підходах ПЛ до ПС; отже, захищеність обладнання ВРП від грозових перенапруг також істотно залежить від опору заземлення опор на підходах ПЛ до ПС;

2. Так як число ударів блискавки в опори та троси принаймні на порядок більше числа проривів блискавки на фазні дроти, то найважливішим завданням захисту обладнання ПС від грозових перенапруг є забезпечення якнайнижчих опорів заземлення опор ПЛ на підходах до ПС;

3. Найбільш важливе забезпечення мінімальних опорів заземлення 2-3 найближчих до ПС опор приєднаних ПЛ;

4. У разі неможливості забезпечення малих опорів заземлення найближчих до ПС опор приєднаної ПЛ високої захищеності обладнання ПС від грозових перенапруг можна досягти установкою захисного апарату (розрядника або ОПН) у лінійному осередку цієї ПЛ.

4.5 Оцінка вірогідної кількості років якісної безаварійної роботи обладнання підстанції при грозових перенапругах

Згідно з даними для ПЛ 500 кВ на проміжних опорах типу ПБ-500-1

визначені такі необхідні для розрахунку величини: N 84 удару на 100 км

довжини ПЛ та 100 грозових годин; відносне число (ймовірність) проривів

блискавки на фазні дроти $n_{\text{др}} = 0.0052$ о.е.; відносне число ударів блискавки в

опору $n_{\text{опор}} = 0.24$ о. і в трос $n_{\text{трос}} = 0.76$ о.о.

Вихідні дані для розрахунку наведені в табл.4.4., яка складає на основі

табл.4.2-4.3 та рис.4.12, рис.4.16, а результати розрахунків містяться у

табл.4.5.

Таблиця 4.4.

Вихідні дані для розрахунку, щодо найменш захищеного від грозових перенапруг обладнання ВРП 500 кВ ПС

і	удар блискавки	Устаткування	$l_{\text{небез}}^i$, км	$l_{\text{небез}}^i \cdot R_{\text{др}}$, о.е. x км	$l_{\text{небез}}^i \cdot R_{\text{опор}}$, о.е. x км		$l_{\text{небез}}^i \cdot R_{\text{опор}}$, о.е. x км
					<20 Ом	50 Ом	
1	ПЛ-500кВ	ТН-500	1,35	0,110	0	0,034	0
2	ПЛ-500кВ	НДБ-500	0,45	0,055	0	0,022	0

Таблиця 4.5.

Оцінка захищеності від грозових перенапруг найменш захищеного обладнання ВРП 500 кВ ПС (при $T_4 = 100$ годин на рік)

і	удар блискавки	устаткування	R3, Ом	n, 1/рік	M, років
1	ПЛ	ТН-500	<20	0,00048	2100
			50	0,00733	140
2	ПЛ	НДБ-500	<20	0,00024	4160
			50	0,00468	210

Загальний рівень захищеності ПС від грозових перенапруг визначається найбільш віддаленим від захисних апаратів обладнанням – вимірювальними трансформаторами напруги ТН-500 та НДЕ-500, і тому в результаті розрахунків грозових перенапруг важливо оцінити достатність захищеності саме цього обладнання.

Для цього отримані в табл.4.4 оцінки M захищеності обладнання від грозових перенапруг зіставлені з рівнями, що рекомендуються.

Рекомендований показник надійності грозозахисту найдорожчого та відповідального підстанційного обладнання 500 кВ (силових трансформаторів, автотрансформаторів та шунтуючих реакторів) становить $M=800:1000$ років.

Рекомендацій щодо значень M для трансформаторів напруги 500 кВ у нас немає, так само як їх немає і для іншого обладнання, крім «найбільш відповідального».

Це означає, що основна увага повинна приділятися захисту від грозових перенапруг найбільш дорогого обладнання ПС, яким є силові трансформатори та автотрансформатори.

Представлені загальні рекомендації щодо достатніх величин показника M засновані на прийнятному для енергосистеми числі пошкоджень найбільш дорогого обладнання від грозових перенапруг в рік. Однак, перерви в постачанні споживачів електричною енергією можуть бути викликані пошкодженням не тільки силових трансформаторів і автотрансформаторів, а й будь-якого іншого обладнання ПС, а з цих позицій економічно доцільний рівень надійності захисту від грозових перенапруг має бути досить високим не тільки для дорогого обладнання ПС, але й усієї підстанції загалом.

Наприклад, якщо на ПС врахувати велику кількість трансформаторів струму, які є найважливішими в організації релейного захисту всієї ПС та приєднаних ПЛ, то необхідний рівень захищеності кожного з них буде навіть вищим, ніж для встановлених силових трансформаторів та автотрансформаторів.

Наприклад, якщо на ПС врахувати велику кількість трансформаторів струму, які є найважливішими в організації релейного захисту всієї ПС та приєднаних ПЛ, то необхідний рівень захищеності кожного з них буде навіть вищим, ніж для встановлених силових трансформаторів та автотрансформаторів.

Браховуючи викладене, а також велику кількість вихідних даних, що впливають на результати розрахунків М, достовірне знання та завдання яких неможливо, в даний час першою мірою назріло питання про зміну підходів до вибору схем захисту обладнання ПС від грозових перенапруг.

Нові схеми захисту обладнання від грозових перенапруг, побудовані з використанням сучасних захисних апаратів типу ОПН, повинні забезпечувати підвищену надійність всього обладнання ПС, а не силових трансформаторів. Як було показано вище, що найефективнішими схемами захисту устаткування ПС від грозових перенапруг слід визнати каскадні

(рис.4/13).

4.6

Розрахунок імпульсних струмів і енергій, що виділяються, при грозових перенапругах

Крім розглянутого вибору числа та місць встановлення захисних апаратів на підстанції, що забезпечують високий рівень захисту обладнання від грозових перенапруг, важливим є питання впливу на самі захисні апарати.

Коректне визначення струмових та енергетичних навантажень на ОПН дозволяє правильно сформулювати вимоги до відповідних технічних характеристик цих захисних апаратів та знизити ризик їх пошкодження, тобто, зрештою, підвищити надійність роботи ПС у цілому.

4.7 Розрахунок амплітуди імпульсного струму в ОПН у режимі обмеження грозових перенапруг

Нехай на ПС по приєднаній до неї лінії набігає грозова хвиля $u_{гр}(t)$, яка дією встановленого на підстанції ОПН буде обмежена в місці його встановлення до рівня $u_{опн}(t)$. Розрахункова схема визначення імпульсного струму $i_{опн}(t)$ в ОПН, складена за правилом еквівалентної хвилі, наведено на

рис.4/17.

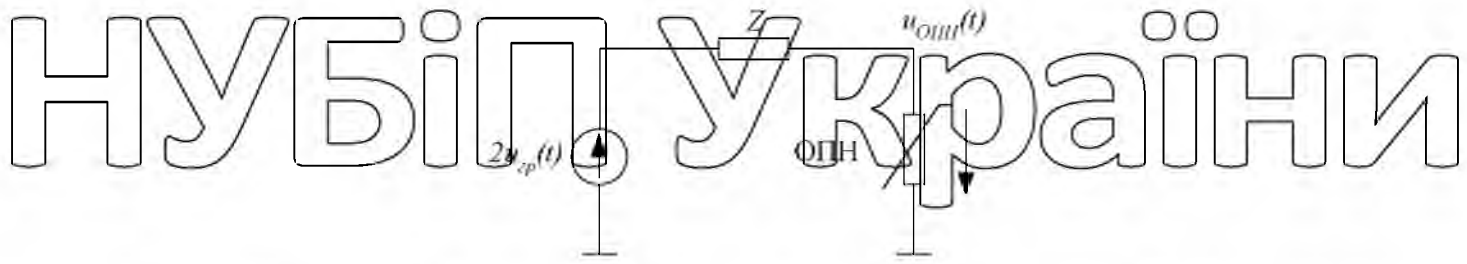


Рис.4.17 Еквівалентна схема визначення струму в ОПН

Максимальне значення імпульсу струму $I_{сп}^{опш}$ може бути знайдене як:

$$I_{сп}^{опш} = \frac{2 \cdot U_{max}^{сп} - U_{зал}^{сп}}{Z_k^{пл}}$$

де $U_{max}^{сп}$ - імпульсна міцність ізоляції ПЛ при грозових перенапругах;

$U_{зал}^{сп}$ - напруга ОПН, що залишається, в режимі обмеження грозових перенапруг; $Z_k^{пл}$ - хвильовий опір фазного дроту ПЛ з урахуванням імпульсної корони.

У табл.4.5. наведено вихідні дані та результати розрахунків за формулою, отримані за умови $U_{зал}^{сп} = 2 \times \sqrt{2} \times U_{нр} \text{ мережі} \cdot \sqrt{3}$ тобто при кратності обмеження грозових перенапруг у місці установки ОПН, що дорівнює двом, по відношенню до амплітуди фазного значення найбільшої робочої напруги мережі $U_{нр} \text{ мережі}$.

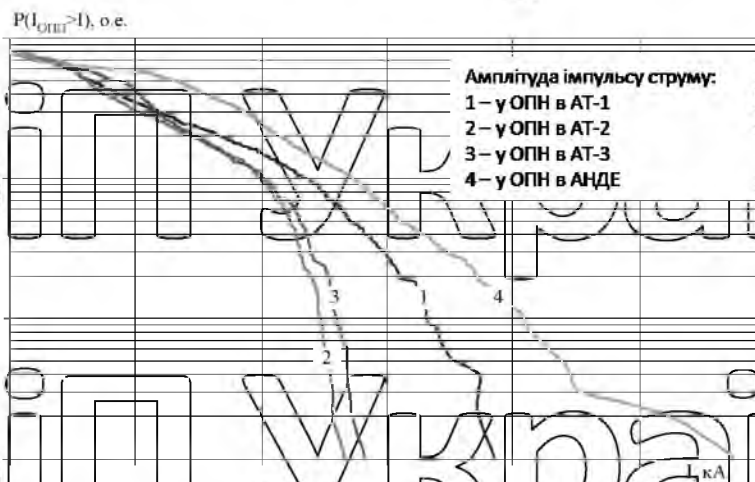
Таблиця 4.5.

Амплітуда імпульсного струму ОПН в режимі обмеження грозових перенапруг, викликаних віддаленими ударами блискавки приєднані до ПС лінії

Розрахунки	$U_{ном}$, кВ	110	220	330	500	750
	$U_{нр} \text{ мережі}$, кВ	126	252	363	525	787
	$U_{max}^{сп}$, кВ	730	1300	1850	2350	2900
	$Z_k^{пл}$, Ом	300	300	200	200	200
По МЭК	$I_{сп}^{опш}$, кА	4,2	7,3	15,5	19,2	21,6
		10(5)	10	10	20 (10)	20

Результати розрахунків загалом узгоджуються з рекомендаціями МЕК щодо вибору номінального розрядного струму ОПН, як наведені в останньому рядку вищенаведеної табл.4.5.

Формула $I_{тр}^{опн}$, отримана без урахування багаторазових відображень хвиль, що поширюються між точкою удару блискавки в ПЛ та точкою ПС, в якій встановлено ОПН, й тому відповідає так званим віддаленим ударам блискавки, тобто не може бути коректно застосована при близьких до ПС ударах блискавки ПЛ



За допомогою рис.4.18 показано, що найбільші за амплітудою імпульсні струми протікають у ОПН, встановленому в лінійному осередку ураженої блискавкою ПЛ, а також те, що максимальні імпульсні струми в кожному з ОПН помітно менше, ніж 19 кА, зазначені в табл.4.5 мережі 500 кВ. Відмінність даних рис.4.18 від табл.4.5 пов'язано з великою кількістю встановлених на ПС захисних апаратів 500 кВ, тоді як при отриманні табл.4.5 мною враховувався лише один із них.

На рис.4.19 у разі близького до ПС удару блискавки у фазний провід ПЛ відображено вплив числа автотрансформаторів (зі своїми ОПН), що знаходяться у роботі, на максимальні значення грозових імпульсних струмів у ОПН, встановленому у НДЕ-500 кВ.

Показано, що максимальні значення імпульсних струмів в ОПН залежать від числа приєднань, що знаходяться в роботі, а також те, що при близьких до ПС ударах блискавки амплітуда струму в ОПН (крива 1 на рис.4.19) може перевищувати значення, відповідне віддаленому від ПС удару блискавки у приєднану ПЛ (див. табл.4.5).

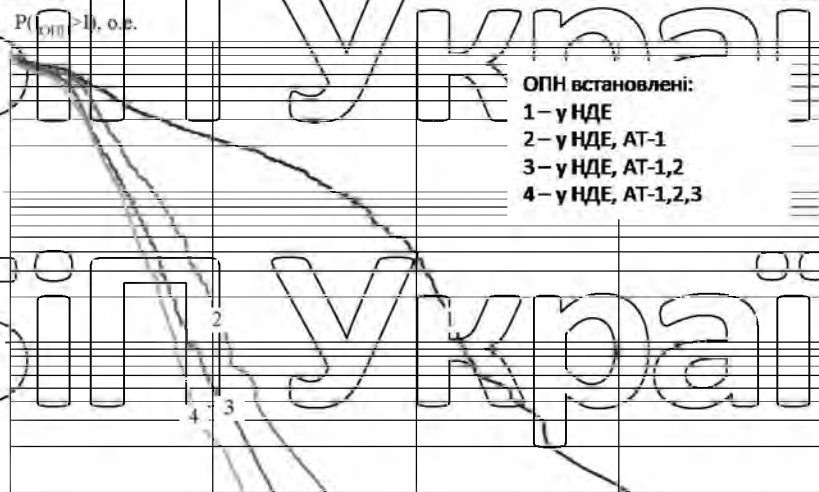


Рис.4.19. Вплив числа автотрансформаторів, що знаходяться в роботі, та їх ОПН 500 кВ на максимальні імпульсні струми у ОПН, встановленому на ПС у НДЕ-500, при ударі блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ за 450 м від входу ПС (врахована імпульсна корона, робоча напруга +428 кВ на проводах ПЛ та ВРП)

На рис.4.20 в разі близького до ПС удару блискавки у фазний провід ПЛ відбито вплив віддаленості місця удару блискавки у фазний провід ПЛ, на максимальні імпульсні струми у встановлених на ПС захисних ОПН. Показано, що при близьких до ПС ударах блискавки в приєднанні ПЛ максимальні значення імпульсних струмів у ОПН можуть перевищувати 50-100 кА. Слід розуміти, що крива №1 на рис.4.20 відповідає прямому удару в ОПН, встановленому у НДЕ-500 кВ, який, по суті, є проривом блискавки через систему блискакводводів ПС та може вважатися нерозрахунковим випадком при виборі ОПН, чого вже не можна сказати про криву №2 на рис.4.20.

При отриманні рис.4.18-4.20 вважалось, що всі чотири комплекти захисних апаратів, встановлених в ВРП 500 кВ, мають однакові вольтамперні

характеристики (напруга, що залишається, на імпульсі $8/20 \mu\text{с}$ амплітудою 10 кА становить 1050 кВ).

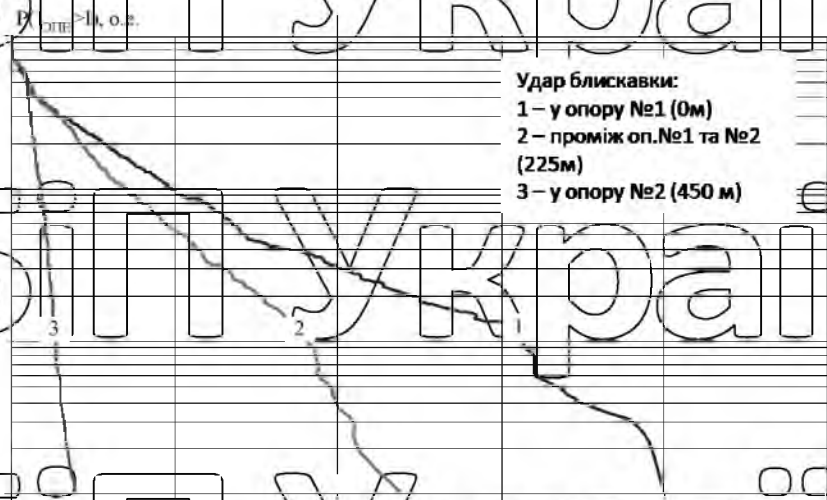


Рис.4.20. Вплив віддаленості від входу ПС, місця удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на максимальні імпульсні струми в ОПН 500 кВ, встановленому у ПДЕ-500 (врахована імпульсна корона на проводах ПЛ; враховано робочу напругу $+428 \text{ кВ}$ на проводах; АТ-2,3 та їх ОПН виведені з роботи)

На основі рис.4.18-4.20 зроблено висновок про необхідність випробувань ОПН імпульсами струму з великою амплітудою.

Як амплітуду таких імпульсів в МЕК прийнято 65 і 100 кА . Для наочного обґрунтування можливості проткiання в ОПН настiльки великих iмпульсних струмiв неoбхiдна схема рис.4.21, на якiй розглянуто удар блискавки $i_m(t)$ у фазний провiд ПЛ у найблiзшому до ПС прольотi довжиною $l_1 + l_2$, по кiнцях якого враховано гiрлянди iзоляторiв та ОПН.

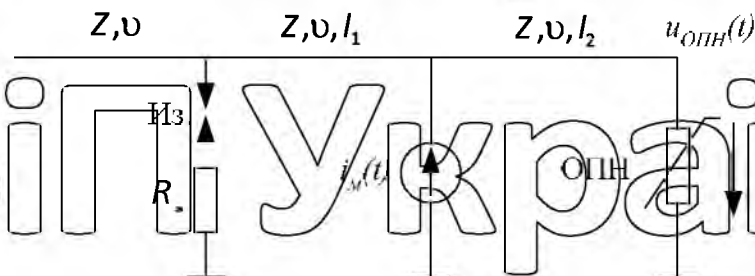


Рис.4.21. Спрощена схема визначення струму в ОПН при близькому ударі блискавки

Розрахункові осцилограми імпульсних струмів в ОПН 500кВ, встановленому на вході ПС, при $l_1 + l_2 = 450 \text{ м}$; $l_1 + l_2 = 225 \text{ м}$; $Z = 200 \text{ Ом}$ (див.

табл.4.5), $v = 300 \text{ м/мкс}$; витримуваний напрузі ізоляції 2350 кВ (див. табл.4.5) наведено на рис.4.22-4.24.

При отриманні рис.4.22-4.24 у спрощеній схемі рис.4.21 не враховувалися вольт-секундна характеристика повітряної ізоляції при малих передрозрядних часах, опір каналу блискавки, ошиновка підстанції, імпульсна корона й втрати, індуктивність опорів та наявність трасів.

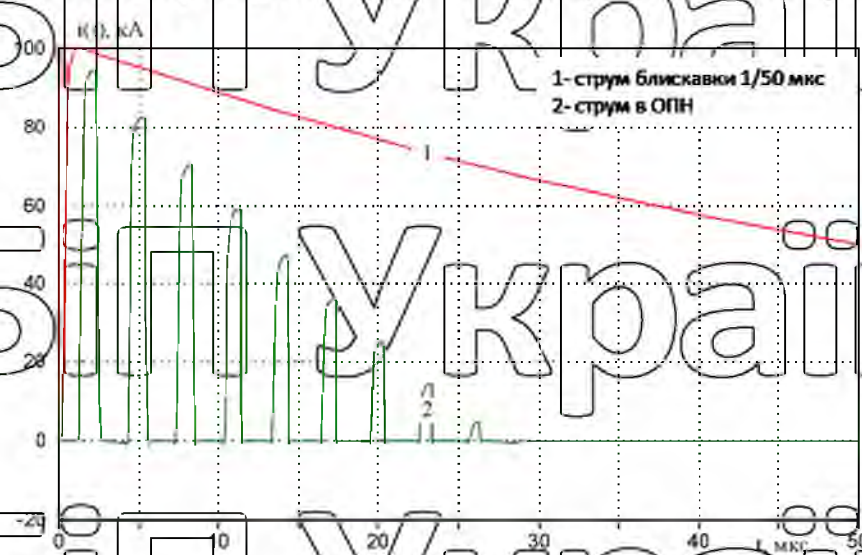


Рис.4.22. Імпульсний струм в ОПН при близькому ударі блискавки (схема рис.4.21, струм блискавки 1/50 мкс з амплітудою 100 кА, опір заземлення опори $R_s = 0 \text{ Ом}$)

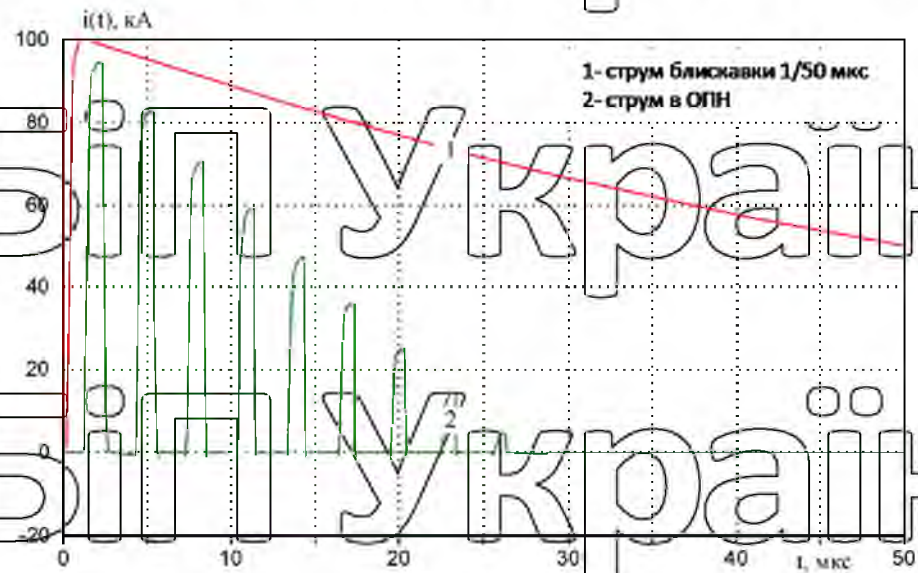


Рис.4.23. Імпульсний струм в ОПН при близькому ударі блискавки (схема рис.4.21, струм блискавки 1/50 мкс з амплітудою 100 кА, опір заземлення опори $R_s = 20 \text{ Ом}$)

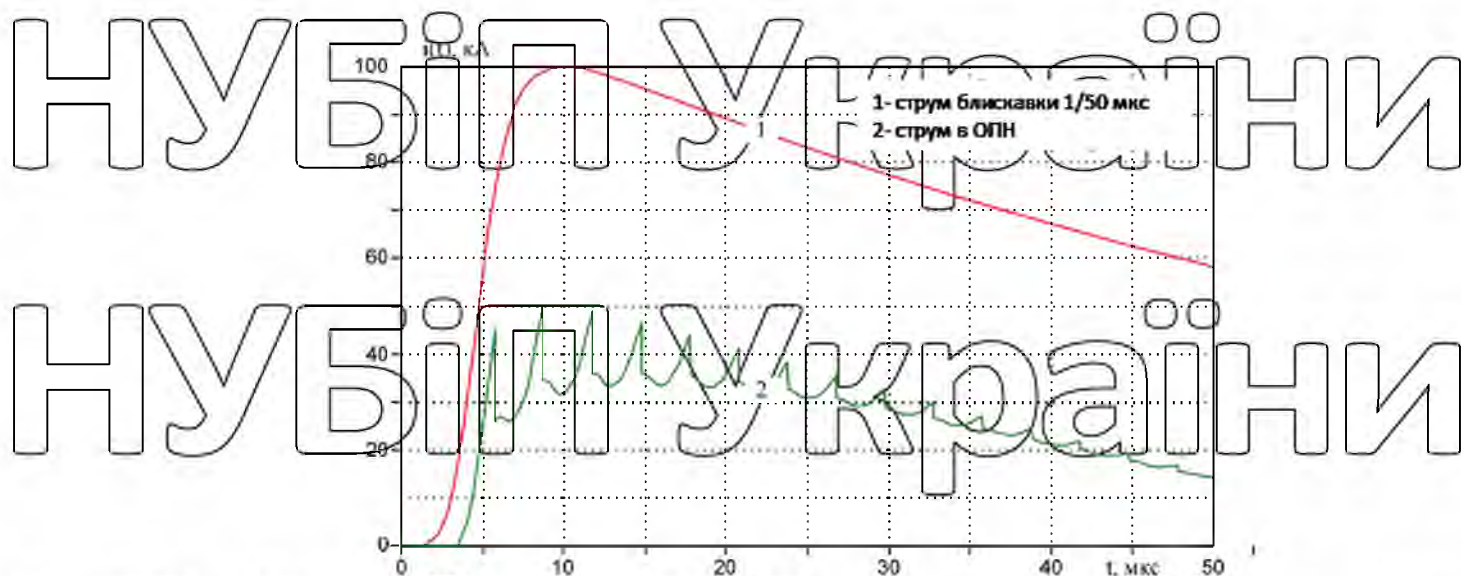


Рис.4.24. Імпульсний струм у ОПН при близькому ударі блискавки (схема рис.4.21, струм блискавки 10/50 мкс з амплітудою 100 кА, опір заземлення опори $R_z = 20 \text{ Ом}$)

З використанням рис.4.22-4.24 показано, що амплітуда імпульсного

струму в ОПН при близькому до ПС удару блискавки в ПЛ може досягати

амплітуди імпульсу струму блискавки, а форма струму в ОПН, тобто енергія,

що виділяється, істотно залежить від опору заземлення опори та від тимчасових параметрів імпульсу струму блискавки.

Великі амплітуди імпульсних струмів в ОПН обумовлені

багаторазовими відображеннями хвиль, що поширюються між точкою удару

блискавки в ПЛ, точкою ПС, в якій встановлено ОПН, і заземлювачем найближчої до місця удару блискавки опори ПЛ з гірляндою ізоляторів.

За розрахунковими осцилограмами рис.4.21-4.23, отриманими при

близьких до ПС ударах блискавки, слід очікувати підвищених енергій, що

виділяються в ОПН порівняно з енергією при віддалених ударах блискавки.

Розрахунок енергій, що виділяються у ОПН в режимі обмеження

грозових перенапруг енергія, що виділяється в ОПН, може бути визначена за

допомогою виразу:

$$W_{\text{ОПН}} = \int_0^t i_{\text{ОПН}}(t) \cdot i_{\text{ОПН}}(t) \cdot dt.$$

У сфері великих максимальних значень імпульсних грозових струмів, що протікають по ОПН, його напруга, що залишається, внаслідок високої нелінійності варисторів практично не змінюється і, тому, будемо вважати, що напруга, що залишається на ОПН, залишається постійною та рівною величині

$U_{опн}(t) = U_{зал}^{гр}$ - що залишається у режимі обмеження грозових перенапруг (відповідає напрузі ОПН, що залишається, при струмах 8/20 мкс з амплітудами 5-10 кА).

Зі схеми рис.4.17 та правила еквівалентної хвилі для випадку віддаленого від ОПН удару блискавки у ПЛ можна записати:

$$i_{опн}(t) = \frac{2 \cdot u_{зп}(t) - u_{опн}(t)}{Z_{к}^{пл}}$$

звідки з урахуванням зроблених припущень:

$$i_{опн}(t) = \frac{2 \cdot u_{зп}(t) - U_{зал}^{зп}}{Z_{к}^{пл}}$$

Тимчасовими характеристиками грозових імпульсів напруги є тривалість фронту імпульсу та умовна тривалість імпульсу до його півспаду. Для спрощення завдання будемо характеризувати хвилі грозових перенапруг тільки їх умовною тривалістю через те, що тривалість переважної більшості імпульсів значно перевищує тривалість їх фронтів. Аналітично

хвиля грозових перенапруг, що набігають на підстанцію $u_{зп}(t)$ з амплітудою $U_{пmax}^{гр}$ може бути записана в наступному вигляді:

$$u(t) = U_{пmax}^{гр} \cdot \exp(-t/\tau),$$

де τ - постійна часу імпульсу. Задавши умовну тривалість імпульсу $t = t_{0.5}$, можна записати:

$$\frac{u(t_{0.5})}{U_{пmax}^{гр}} = \exp(-t_{0.5}/\tau),$$

визначимо постійну часу імпульсу:

$$\tau = \frac{t_{0.5}}{\ln(2)}$$

Імпульсний струм в ОПН буде протікати доти, до поки напруга, що впливає на нього, $2U_{\text{сп}}(t)$ не стане менше його напруги $u_{\text{опн}}(t) = U_{\text{зал}}^{\text{ГР}}$, звідки тривалість $t_{\text{зал}}$ протікання струму в ОПН може бути знайдена з умови

$$\frac{u_{\text{опн}}(t)}{U_{\text{max}}^{\text{сп}}} = \exp(-t / \tau),$$

Винайдемо постійну часу імпульса:

$$U_{\text{зал}}^{\text{ГР}} = 2U_{\text{max}}^{\text{сп}} \cdot \exp(-t / \tau),$$

Імпульсний струм в ОПН буде протікати доти, поки напруга, що впливає на нього $u_{\text{опн}}(t) = U_{\text{зал}}^{\text{ГР}}$, звідки тривалість $t_{\text{зал}}$ протікання струму в ОПН може бути знайдена виразом:

$$U_{\text{зал}}^{\text{ГР}} = 2U_{\text{max}}^{\text{сп}} \cdot \exp(-t / \tau),$$

Тому:

$$t_{\text{зал}} = \tau \cdot \ln \left(\frac{2U_{\text{max}}^{\text{сп}}}{U_{\text{зал}}^{\text{ГР}}} \right)$$

Вводимо позначення:

$$K_{\text{сп}} = \frac{U_{\text{max}}^{\text{сп}}}{U_{\text{зал}}^{\text{ГР}}}$$

Коефіцієнт, рівний відношенню імпульсної міцності лінійної ізоляції ПЛ до напруги, що залишається на ОПН у режимі

обмеження грозових перенапруг. З урахуванням позначень отримаємо $t_{\text{зал}} = \tau \cdot \ln(1/2K_{\text{сп}})$.

Енергія, поглинена ОПН в режимі обмеження грозових перенапруг, дорівнює:

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}} = \int_0^{t_{\text{зал}}} U_{\text{макс}}^{\text{сп}} \cdot i_{\text{опн}}(t) \cdot dt = \frac{U_{\text{макс}}^{\text{сп}}}{Z_k^{\text{опн}}} \cdot \int_0^{t_{\text{зал}}} (2 \cdot U_{\text{макс}}^{\text{сп}} \cdot \exp(-t/\tau) - U_{\text{зал}}^{\text{сп}}) dt$$

Перетворимо далі на вигляд:

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}} = \frac{(U_{\text{макс}}^{\text{сп}})^2}{Z_k^{\text{опн}}} \cdot \int_0^{t_{\text{зал}}} (2 \cdot K_{\text{сп}} \cdot \exp(-t/\tau) - 1) dt$$

Та обчислимо інтеграл:

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}} = \frac{(U_{\text{макс}}^{\text{сп}})^2}{Z_k^{\text{опн}}} \cdot [-2 \cdot \tau \cdot K_{\text{сп}} \cdot (\exp(-t_{\text{зал}}/\tau) - 1) - t_{\text{зал}}]$$

Використовуючи вирази для t і $t_{\text{зал}}$, після перетворення маємо:

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}} = \frac{(U_{\text{макс}}^{\text{сп}})^2}{Z_k^{\text{опн}}} \cdot \frac{t_{0.5}}{\ln(2)} \cdot [2 \cdot K_{\text{сп}} - \ln(2K_{\text{сп}}) - 1]$$

Або

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}} = \frac{(U_{\text{макс}}^{\text{сп}})^2}{Z_k^{\text{опн}}} \cdot \frac{t_{0.5}}{\ln(2)} \cdot \frac{[2 \cdot K_{\text{сп}} - \ln(K_{\text{сп}}) - 2]}{(K_{\text{сп}})^2}$$

Питома енергія, що виділяється в ОПН в режимі обмеження грозових перенапруг енергія, стосовно найбільшої робочої напруги ОПН, відповідному фазному значенню найбільшої робочої напруги мережі $U_{\text{фр}}$ мережі визначається виразом:

$$W_{\text{ОПН}}^{\text{сп,фр}} = \frac{W_{\text{ОПН}}^{\text{сп}}}{U_{\text{фр}} / \sqrt{3}}$$

За допомогою наведеної формули, наочно наведено, що енергія, яка виділяється у ОПН пропорційна тривалості впливає на ОПН грозової хвилі,

а також пропорційна квадрату її амплітуди, безпосередньо пов'язаної з імпульсною міцністю гірлянди ізоляторів ПЛ.

Два останні вирази дозволяють визначити енергію, що виділяється в ОПН при одноразовому впливі на нього грозового імпульсу. Відомо, що блискавки складаються з кількох компонент, тобто енергія, що виділяється в ОПН, повинна бути отримана з урахуванням можливого числа компонентів блискавки та їх часових параметрів.

З іншого боку, на підстанції, як правило, встановлено кілька комплектів ОПН, що знижує енергетичні навантаження на кожен з них і тому розрахунки за формулами проведені тільки для одного імпульсу.

Вихідні дані для проведення розрахунків за формулами вказані в табл.4.5, а результати розрахунків – в табл.4.6, отриманої при

$$U_{зал}^{2P} = 2 \times (\sqrt{2} \times U_{нр}^{мереж} \cdot \sqrt{3}).$$

Таблиця 4.6.

Енергія, що виділяється в ОПН в режимі обмеження грозових перенапруг, викликаних віддаленими ударами блискавки приєднані до ПС лінії

	$t_{0,5}$, мкс	НОМ $U_{НОМ}$, кВ				
		110	220	330	500	750
$W_{ОПН}^{ГР}$, кДж	50	42	141	432	737	1195
	150	126	424	1297	2211	3585
$W_{ОПН}^{УД,ГР}$, кДж/кВ	50	0,6	1,0	2,1	2,4	2,6
	150	1,7	2,9	6,2	7,3	7,9

Дані табл.4.6 відповідає віддаленому від ПС удару блискавки ПЛ, тобто, не можуть бути використані при близьких до ПС ударах блискавки ПЛ.

На рис.4.25 показано для випадку близького до ПС удару блискавки у фазний провід ПЛ, вплив віддаленості місця удару блискавки на енергію, що виділяється в одному ОПН. З рис.4.25 видно, що при близьких до ПС ударах блискавки в приєднані ПЛ (криві 1-2) максимальна енергія в ОПН може перевищувати значення, вказані в таблиці 4.6 для віддаленого удару.

Криві 3-5 на рис.4.25 дають енергії, що виділяються в ОПН, менше значень, зазначених у табл.4.6 для віддаленого удару, що пояснюється, по-перше, використаними одночасно двома комплектами ОПН (у НДЕ-500 і у АТ-1), по-друге, наявністю приєднаної до шин ПС лінії 500 кВ, а по-третє, – перекриттям у розрахунковій моделі гірлянди ізоляторів ПЛ 500 кВ, ураженої блискавкою.

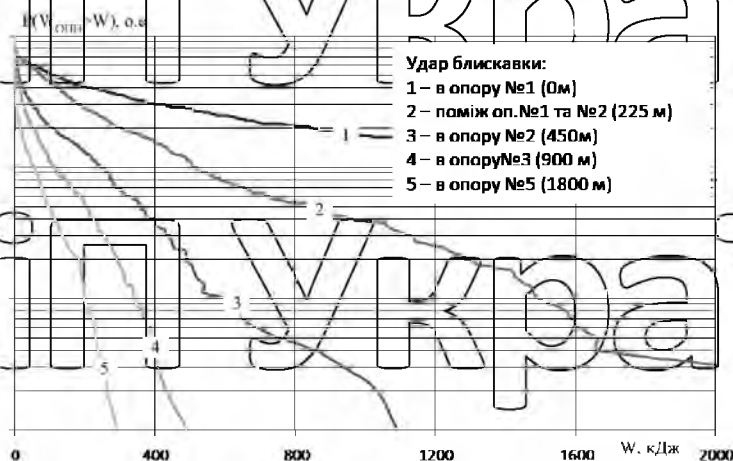


Рис.4.25. Вплив віддаленості від входу ПС місця удару блискавки у фазний провід ПЛ 500 кВ на енергію, що виділяється в ОПН 500 кВ, встановленому у НДЕ-500 (врахована імпульсна корона на проводах ПЛ; враховано роботу напругу +428 кВ на проводах ПЛ і ВРЛ; 2,3 та їх ОПН виведені з роботи)

Для порівняння розрахункових енергій, що виділяються в ОПН (табл.4.6 та рис.4.25) з величинами енергій, що виділяються у ОПН при їх випробуваннях грозовими імпульсами струму, розрахунковим шляхом з використанням програмного комплексу ЕМТР отримана табл.4.7.

Випробувальні імпульси грозових струмів форми 8/20 мкс і 4/10 мкс, зазначені в табл.4.7, є досить короткими порівняно з тими імпульсами, для яких табл.4.6 була визначена енергія в ОПН. Для ілюстрації цього на рис.4.26 показана форма імпульсу струму в ОПН 500 кВ, отримана в схемі рис.4.17 при параметрах грозової гвинтової хвилі з табл.4.6. На рис.4.26 показано, що імпульсні грозові струми ОПН можуть мати умовну тривалість до 100 мкс, тобто, у кілька разів більше, ніж випробувальні 8/20 та 4/10 мкс.

Таблиця 4.7.

Енергія, що виділяється в ОПН у процесі їх випробувань грозовими імпульсами струму різної форми та амплітуди

Імпульс струму, мкс/мкс	Амплітуда струму, кА	Енергія одного імпульсу, кДж для ОПН класів напруги, кВ				
		110	220	330	500	750
8/20	5	19	37	52	71	104
	10	40	78	111	151	220
4/10	20	85	164	234	319	465
	65	151	293	418	569	831
	160	240	467	667	906	1323

Для оцінки допустимості впливу на ОПН довгих грозових імпульсів струму; енергію, що виділяється при цьому, правильніше порівнювати з енергією, що виділяється у ОПН в процесі випробувань відносно довгими імпульсними струмами, на роль яких найбільш підходить прямокутний імпульс струму тривалістю 2000 мкс.

Про допустимість на ОПН довгих імпульсів грозових струмів свідчить порівняння енергій по табл.4.6 (випадок довгого імпульсу 150 мкс) з випробувальною енергією типових ОПН 110-750 кВ, яка отримана на прямокутних імпульсах струму.

Для оцінки прийнятності на ОПН щодо коротких грозових імпульсів струму досить порівняти енергії по табл.4.6 (випадок імпульсу 50 мкс) і з випробувальними енергіями на імпульсах 8/20 і 4/10 мкс (табл.4.7).

На основі порівняння випробувальних енергетичних впливів на ОПН з можливими реальними впливами при обмеженні грозових переанпруг можна зробити висновок про те, що випробувальні впливи на ОПН, загалом, відповідають реальним.

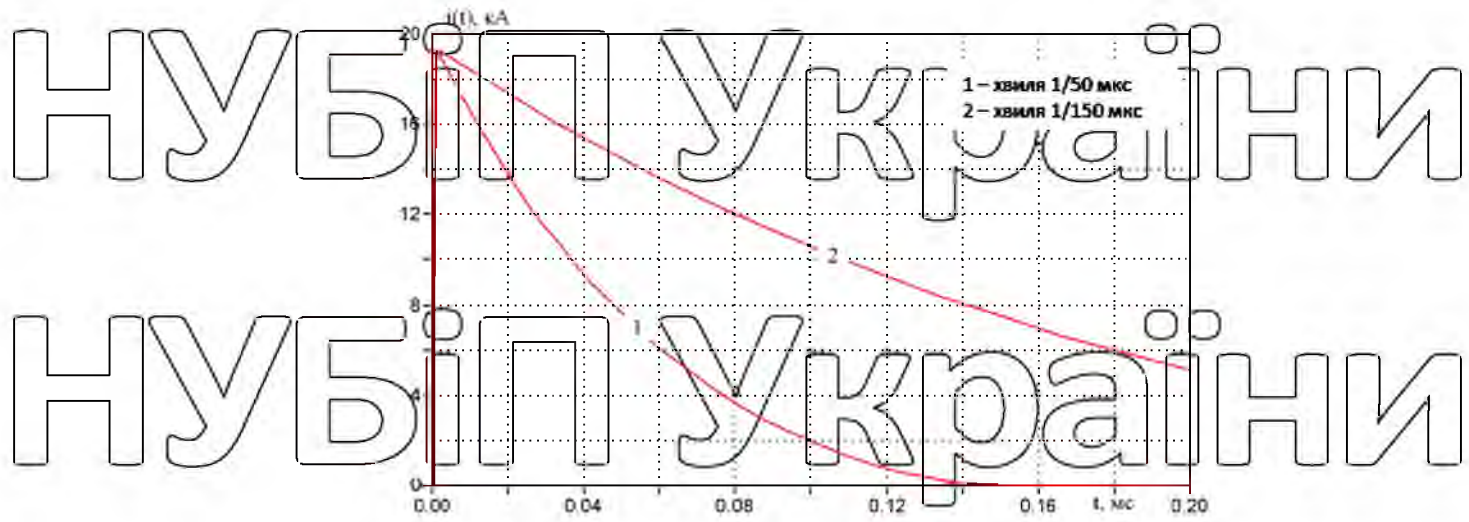


рис.4.26. Форма струму в ОПН 500 кВ у схемі рис.4.17 при різних часових параметрах грозової хвилі що налігає, амплітуда якої відповідає імпульсній міцності Ізоляції ПЛІ 500 кВ

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ, ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ І ЕКОЛОГІЯ

НУБІП України

5.1 Нормативно-правова база, що регламентує застосування

НУБІП України

Насьогодні застосування ОПН регламентується такими документами:

1. В Україні:

- СОУ-Н ЕЕ 40.12-00100227-47 “Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування”;
- СОУ-Н МЕН 40.1-00100227-67:2012 “Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо вибору та застосування у розподільчих установках”.

2. В Росії:

- “Методичні вказівки щодо застосування обмежувачів в електричних мережах 110-750 кВ”;
- “Методичні вказівки щодо застосування обмежувачів перенапруг нелінійних у електричних мережах 6-35 кВ”.

3. Міжнародні стандарти:

- МЭК 60099-5 Розрядники для захисту від перенапруг. Частина 5. Рекомендації щодо вибору та застосування.

4. Розробки, та технічні умови фірм-виробників ОПН.

Стандартна номінальна частота для електромереж в Україні та СНД – 50 Гц. Однак на практиці частота може змінюватися від 48 до 52 Гц.

Стандартними номінальними розрядними струмами 8/20 мкс є 1,5 кА, 2,5 кА, 5 кА та 20 кА. Обмежувачі повинні працювати без ушкоджень у нормальних чи аномальних умовах.

До нормальних експлуатаційних умов належать:

- температура оточуючого повітря в діапазоні від – 40 до +40⁰ С;

НУБІП України

максимальна сонячна радіація 1,1 кДж/м²;
 - висота над рівнем моря не більше 1000 м;
 - частота не менше 48 Гц, не більше 52 Гц,

- напруга промислової частоти, прикладена тривало між выводами обмежувача, не перевищує його тривалої робочої напруги;

- механічні впливи не перевищують величин, обумовлених покупцем;
 - умови забруднення відповідають обраній довжині витоку.

Анормальними умовами експлуатації вважаються умови, відмінні від нормальних, які потребують спеціального розгляду при їх проєктуванні, виробництві та застосуванні.

Крім розглянутих вище факторів впливу, не зайве обумовити такі

впливи або параметри:

- вольтамперні характеристики обмежувачів при грозових імпульсах та внутрішніх (комутаційних) перенапругах;
 - рівень часткових розрядів при напрузі, що становить 105% від

максимальної тривало допустимої робочої напруги;

- здатність до розсіювання енергії при прямокутному імпульсі;
 - електрична міцність зовнішньої ізоляції (корпусу) обмежувача з урахуванням її забруднення та зволоження.

Умови застосування, монтажу та експлуатації ОПН у

електроустановках напругою від 6 до 750 кВ в Україні регламентуються законом України про «Ринок електричної енергії», наказом № 374

Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 23.05.14 р.,

інструкцією №842/25619 від 21.07.2014 р., Правил технічної експлуатації

електроустановок споживачів, затверджених наказом Міністерства палива та

енергетики України від 25 липня 2006 року № 258, Правил безпечної експлуатації електроустановок, затверджених наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 06 жовтня 1997 року № 257;

Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 09 січня 1998 року № 4; ГОСТ 1516.1-76

"Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ.

Требования к электрической прочности изоляции"; ГОСТ 1516.2-97

"Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции"; ГОСТ 15150-69 "Машины, приборы и другие технические

изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории,

условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды"; ГОСТ 16357-83 "Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ.

Общие технические условия"; ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия.

Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения";

ГОСТ 9920-89 (МЭК 815-86, МЭК 694-86) "Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции";

ГОСТ 1425-96 (МЭК 529-89) "Степени защиты, обеспечиваемые оболочками. Код IP"; ГОСТ 10434-82 "Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования";

галузевим керівним документом 34.20.507-2003 "Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила", затвердженого наказом Міністерства палива та енергетики України від 13 червня 2003 року № 296; СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007

"Норми випробування електрообладнання", затвердженого наказом Міністерства палива та енергетики України від 15 січня 2007 року № 13; СОУ-Н ЕЕ 40.12-001100227-47:2011 "Обмежувачі перенапруг нелінійні

напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування",

затвердженого наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 травня 2011 року № 124; СОУ-Н МЕНВ 40.1-21677681-67:2012

"Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 6-35 кВ. Настанова щодо

вибору та застосування у розподільних установках", затвердженого наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 13 липня 2012 року № 515.

5.2 Вентильні розрядники

Призначені для захисту ізоляції від грозових та короточасних комутаційних перенапруг. ВР можуть експлуатуватися на відкритому повітрі на висоті до 1000 м над рівнем моря. Кліматичне виконання та категорія розміщення ВР повинні відповідати нормальним значенням кліматичних

чинників зовнішнього середовища в місці установлення відповідно до вимог

ГОСТ 5150.

Номинальна напруга ВР, їх пробивні та залишкові напруги (ГОСТ 16357) повинні відповідати найбільшим робочим напругам і рівням

електричної стійкості ізоляції електроустаткування (ГОСТ 1516.1).

5.3 Обмежувачі перенапруг нелінійні

ОПН, що призначені для захисту від грозових і комутаційних перенапруг ізоляції електроустаткування електроустановок 6-750 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц, можуть застосовуватись у ВРП або ЗРП відповідно до ГОСТ 15150 - 69.

Захист ізоляції обертових машин напругою 6-24 кВ здійснюється за допомогою ОПН відповідної номінальної напруги та виконання згідно з Циркулярним листом Головлтехуправління Мініенерго СРСР від 12.01.83 р. N

8-8/6 «Об ограничении применения разрядников типа РВРД», застосовувати їх не рекомендується.

5.4 Трансформаторні підстанції

Трансформатори (АТ) з ізоляцією (ГОСТ 1516.1) потрібно захищати за допомогою розрядників серій РВМГ 110, 150, 220, 330, 500 та 750 кВ (РВМК

330, 500 та 750 кВ - для захисту від комутаційних перенапруг на приєднаннях шунтуючих реакторів) відповідно. Враховуючи те, що зазначені розрядники

знято з виробництва заводу-виготовлювача, за необхідності, можна

використовувати ОПН за напругою електроустановки, що захищається, якщо для їх застосування сприяють місцеві умови.

У мережах 110 кВ і вище при оперативних або автоматичних відключеннях приєднань ПЛ або трансформаторів (АТ), незважаючи на вжиті заходи, можливе як ненавмисне виділення ділянок мережі без трансформаторів із заземленою нейтраллю, так і видалки неповнофазного підключення трансформаторів (АТ) або ПЛ, при яких на ізоляції незаземленої нейтралі обмотки ВН виникає довготривала напруга, яка досягає значень, близьких до випробної однохвилинної напруги (ГОСТ

1516.1). Застосування в нейтралі відповідного ОПН також не вирішує проблеми, тому що напруга, яка виникає на ОПН, припустима для нього протягом не більш 1-2 хв. Якщо після закінчення зазначеного часу цей стан не буде усунуто, то можуть статися вибухи та пожежі, які викличуть пошкодження устаткування.

5.5 Основні вимоги до установлення вентиляційних розрядників і обмежувачів перенапруг нелинійних

ВР і ОПН встановлюються у ВРП, ЗРП на спеціальних конструкціях!

стояках, або на огорожених фундаментах висотою не менше ніж 300; мм від рівня планування підстанції з урахуванням вимог захисту розрядників від зливових вод та висоти снігового покриву.

ВР та ОПН, у яких нижню крайку фарфорового кожуха розташовано над рівнем планування підстанції на висоті понад 2500 мм, можна встановлювати без постійних огорожень.

Найменші відстані в проєкті струмоведучих частин до різних елементів ВРП (підстанцій), захищених за допомогою ОПН, ОПНП і ОПНІ, визначені відповідно до нормативно-технічного документа ВГП «Энергосетьпроект» N 23-09/1-87 від 23.01.87 «О проектировании распределительств 110-750 кВ с укороченными изоляционными промежутками за счет применения новых защитных аппаратов типа ОПН».

Спуски до ВР і ОПН повинні укріплюватись з розрахованою слабиною, щоб уникнути як небезпечного одностороннього тяжіння, так і невіправданих розгойдувань проводів. Оцінюнку ВР і ОПН 6-10 кВ у ВРП та всіх інших напругу ЗРП рекомендується виконувати жорсткими мідними або алюмінієвими шинами.

Біля розрядників 330 кВ та вище типу РВМК у колах заземлення послідовно встановлюються імітатори, призначені для контролю запасу пропускної спроможності нелінійних робочих резисторів (НРР).

5.6 Основні вимоги до монтажу вентиляльних розрядників і обмежувань перенапруг нелінійних

Монтаж ВР та ОПН необхідно виконувати строго відповідно до вимог інструкцій заводу-виготовлювача та вказівок ДНАОП 5.2.30-1.06-98, які уточнюються за необхідності в кожному конкретному випадку.

Після закінчення монтажу проводяться приймально-здавальні випробування ВР та ОПН у обсязі відповідно до вимог інструкції заводу-виготовлювача та ДНАОП 5.2.30-1.06-98.

НУВБІП України

НУВБІП України

НУВБІП України

ВИСНОВКИ

НУВБІП УКРАЇНИ

Зараз до певної міри назріло питання про зміну підходів до вибору схем захисту обладнання розподільчих пристроїв від грозових перенапруг.

НУВБІП УКРАЇНИ

Сьогоднішні стихійні метеорологічні явища, що характеризуються значною інтенсивністю є найнебезпечнішим проявом нестабільності клімату.

Протягом останнього десятиріччя повсюдно, включаючи й Україну, зростає їхня кількість, у багатьох випадках вони завдають суттєвих збитків цілим

НУВБІП УКРАЇНИ

секторам економіки та призводять до людських жертв. Зважаючи на постійно зростаючі вимоги до надійності електропостачання, нові схеми захисту

обладнання від грозових перенапруг, побудовані з використанням сучасних

захисних апаратів типу ОПН, повинні забезпечувати підвищену захищеність

всього обладнання розподільчих пристроїв від грозових перенапруг.

НУВБІП УКРАЇНИ

Враховуючи це, актуальними видаються викладені у розділі 2 пропозиції щодо вибору схем захисту ізоляції обладнання 35-750 кВ від

грозових перенапруг, які базуються на наступних основних висновках,

отриманих в результаті проведених за допомогою ЕМТР досліджень:

НУВБІП УКРАЇНИ

- найбільшою небезпекою для обладнання розподільчих пристроїв є грозові перенапруги, викликані ударами блискавки у фазні дроти

приєднаних ПЛ на відстані не більше 500-1500 м від розподільних пристроїв

(довжина так званого небезпечного підходу);

НУВБІП УКРАЇНИ

- удари блискавки у фазні проводи ПЛ на відстані понад 500-1500 м практично не в змозі викликати небезпечних для устаткування грозових перенапруг на обладнанні розподільних пристроїв;

• для зниження кількості прямих ударів блискавки у фазні дроти,

НУВБІП УКРАЇНИ

тобто й кількості небезпечних грозових перенапруг на обладнанні розподільних пристроїв, на довжині «небезпечного» підходу ПЛ до таких

пристроїв необхідна установка тросового захисту;

збільшення довжини тросового підходу ПЛ до розподільних пристроїв понад довжину «небезпечного» підходу не змінює (не підвищує) захищеності обладнання такого устаткування від грозових перенапруг;

- найменша довжина «небезпечного» підходу ПЛ 35-750 кВ до розподільних пристроїв необхідна на тих приєднаних ПЛ, у лінійних осередках яких (тобто на ПЛ біля входу до розподільного пристрою) встановлені захисні апарати (розрядники або ОПН);

- у деяких випадках на підступах ПЛ 35-110 кВ допустимо не встановлювати трос, так як ОПН лінійного осередку бере на себе виконання ролі троса з зниження кількості небезпечних хвиль, що проходять на розподільний пристрій;

- кількість грозових хвиль, що набігають на розподільчий пристрій, викликаних ударами блискавки у опори та троси приєднаних ПЛ, суттєво залежить від опору заземлення з/б опор на підходах ПЛ до розподільних пристроїв; отже, захищеність обладнання розподільних пристроїв від грозових перенапруг також істотно залежить від опору заземлення з/б опор на підходах ПЛ до розподільчих пристроїв;

- оскільки кількість ударів блискавки у опори та троси принаймні на порядок більша кількості проривів блискавки на фазні дроти, тож найважливішим завданням захисту обладнання розподільчих пристроїв від грозових перенапруг є забезпечення якнайнижчих опорів заземлення з/б опор ПЛ на підходах до розподільного устаткування;

- найважливіше забезпечити мінімальний опір у заземлення 2-3 найближчих до розподільних пристроїв з/б опор, приєднаних ПЛ;

- у разі неможливості забезпечення малих опорів заземлення найближчих до розподільних пристроїв опор приєднаної ПЛ, високої захищеності обладнання розподільчих пристроїв від грозових перенапруг можна досягти за допомогою установки захисного апарату (розрядника або ОПН) у лінійному осередку цієї ПЛ;

найменш захищеним обладнанням розподільних пристроїв є обладнання лінійних осередків приєднаних ПЛ (за відсутності у їх складі захисних апаратів);

- наявність у лінійному осередку приєднаної ПЛ захисного пристрою (розрядника або ОПН) підвищує захищеність від грозових перенапруг встановленого в ньому обладнання;

- наявність у лінійному осередку приєднаної ПЛ захисного апарату істотно підвищує захищеність встановлених у розподільних пристроях силових трансформаторів та автотрансформаторів від грозових перенапруг, викликаних ударами блискавки в цю ПЛ;

- найбільш захищеним від грозових перенапруг буде обладнання того розподільного пристрою, що містить у лінійних осередках приєднаних ПЛ встановлені захисні апарати; у таких розподільних пристроях практично

виключені пошкодження ізоляції силових трансформаторів та автотрансформаторів від грозових перенапруг, викликаних грозовими хвилями, що набігають з приєднаних ПЛ;

- при зниженні напруги, що залишається, захисних апаратів, встановлених у розподільчій притсрій, максимальні грозові перенапруги на устаткуванні знижуються;

- ступінь зниження грозових перенапруг на устаткування (при заданому зниженні напруги, що залишається, захисних апаратів) залежить від віддаленості цього обладнання від захищених апаратів;

- найбільше зниження перенапруг досягається для силових трансформаторів та автотрансформаторів, так як вони розташовані найближче до захисного устаткування;

- мінімальне зниження перенапруг властиве найбільш віддаленому від захисних апаратів устаткуванню розподільному пристрою.

Оскільки АПК України є невід'ємною складовою економіки держави загалом, він також потребує надійних джерел зі збільшеною потужністю та сучасною енергоефективністю, що неможливо без модернізації, та

будівництва нових ПС великої потужності, на кшталт нещодавно введеної в експлуатацію ПС 500 кВ «Кременська». Однією з головних особливостей українського АПК сьогодні є суттєве споживання електроенергії, а також часта потреба купувати її за високими тарифами роздрібного ринку. Крім того, агропромислові підприємства подекуди стикаються з труднощами в отриманні необхідної потужності та технологічним підключенням до мереж через віддаленість підприємств від населених пунктів. Вирішенням проблеми все частіше стає мала розподільна генерація — один з найефективніших інструментів зниження витрат на енергоресурси, що було стратегічною метою введення так званого «Зеленого тарифу». Зайнятість у розподільній генерації сьогодні проявляють саме підприємства АПК. Тож програмний комплекс ЕМТР з допомогою якого виконувались усі розрахунки, може рекомендуватися для використання при проектуванні та модернізації об'єктів живлення різної потужності.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

ВИКОРИСТАННЯ У РОБОТІ МАТЕРІАЛИ ТА ДЖЕРЕЛА

1. Закон України про «Ринок електричної енергії», наказом № 374 Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 23.05.14 р.;
2. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 року № 258;
3. Правила безпечної експлуатації електроустановок, затверджених наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 06 жовтня 1997 року № 257;
4. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 09 січня 1998 року № 4;
5. ГОСТ 1516.3-96. Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции: Межгос. стандарт. – Введ. 01.01.99. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 50 с.
6. ГОСТ 1516.1-76 "Электрооборудование переменного тока на напряжения от 3 до 500 кВ. Требования к электрической прочности изоляции";
7. ГОСТ 1516.2-97 "Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения от 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции";
8. ГОСТ 15150-69 "Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды";
9. ГОСТ 16357-83 "Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3,8 до 600 кВ. Общие технические условия";
10. ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения";
11. ГОСТ 9920-89 (МЭК 815-86, МЭК 694-80) "Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции";

12. ГОСТ 1425-96 (МЭК 529-89) "Стены защиты, обеспечиваемые оболочками.

Код IP";

13. ГОСТ 10434-82 "Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования";

14. Галузевий керівний документ 34.20.507-2003 "Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила", затвердженого наказом Міністерства палива та енергетики України від 13 червня 2003 року №296;

15. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 "Норми випробування електрообладнання", затвердженого наказом Міністерства палива та енергетики України від 15 січня 2007 року № 13

16. СОУ-Н ЕЕ 40.12-001100227-47:2011 "Обмежувачі перенапруг нелінійні напругою 110-750 кВ. Настанова щодо вибору та застосування", затвердженого наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 травня 2011 року № 124;

17. МЭК 60099-5 Розрядники для захисту від перенапруг. Частина 5. Рекомендації щодо вибору та застосування.

18. Козирський В.В. Електропостачання агропромислового комплексу: підручник / Козирський В.В., Каплун В.В., Волошин С.М. – К.: Агр-на освіта, 2011.- 448 с.

19. Васи́лега П.О. Електропостачання: Навчальний посібник / П.О. Васи́лега. – Суми: ВТД "Університетська книга", 2008. – 415 с.

20. Лут М.Г., Мірошник О.В., Грунова І.М. Основи технічної експлуатації енергетичного обладнання АПК.: Підручник для студентів ВНЗ. – Харків, Факт, 2008. – 438 с.

21. Хаммарлунд П. Восстанавливающееся напряжение на контактах выключателя. Под ред. Буткевича Г.В. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 296 с.

22. Гусев Ю.П., Омокеева А.А. Анализ коммутационных процессов в цепях генераторного напряжения малых ГЭС // Электричні станції. -2012. -№12. –С. 33-39.

23. Бушув С., Волков А., Ларін В., Лоханін А., Матвеев Д., Пугаченко З., Семенов Н., Шейко П. Исследование коммутационных перенапряжений, генерируемых вакуумными генераторными выключателями на энергообъекте

- // V Международная конференция «Высоковольтное коммутационное оборудование». Листопад, 2009.
24. Селиванов В.Н., "Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе"// Вісник МГТУ, том 12, №1, 2009 г.
25. Костенко М.В., Ефімов Б.В., Зархі І.М., Гумерова Н.І. Анализ надежности гроззащиты подстанций. –Л.: «Наука», 1981. –128 с.
26. EMTP Rule book. Bonneville Power Administration, Branch of System Engineering. Portland, Oregon 97208-3621, USA (www.emtp.org).
27. Вольпов К.Д., Созинов А.В., Халилов Ф.Х. Результаты измерений входной емкости трансформаторов и реакторов 35-750 кВ//Електричні станції. –1982. –№9. –с.60-61.
28. Кадомська К.П., Рейхердт А.А. Влияние способа моделирования ОПН и волны тока молнии на энергетические характеристики защитных аппаратов, установленных на опорах ВЛ//Електромеханіка і Електроенергетика: Науковий вісник НГТУ. –2002. –№1(12), –с.91-100.
29. Базугкін В.В., Кадомська К.П., Костенко М.В., Міхайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. –СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургське від-ня, 1995. –320 с. – ISBN 5-283-04423-8.
30. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения/под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. –М.: Энергоатомиздат, 1989. –767 с.
31. Костенко М.В., Мессерман Д.Г. Деформация волн грозовых перенапряжений в линиях передачи сверх и ультравысокого напряжения при большой длине пробега//Відомості академії наук СРСР: Енергетика і транспорт –1987. –№3. –с.158-164.
32. Костенко М.В., Кадомська К.П., Левінштейн М.Л., Ефремов І.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. –Л.: «Наука», Ленинградське від-ня, 1988. –302 с. – ISBN 5-02-024434-1.
33. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. –320 с. –ISBN 5-9221-0082-3.

34. Кадомекая К.И., Борисов Е.А. О моделировании волн тока молнии при исследовании грозозащиты электроэнергетических объектов//Сборник научных трудов НГТУ. –2003. –№2(32). –с.89-98.

35. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide For Improving the Lightning Performance of Transmission Lines//The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. – New York, 1997. –36 p. –ISBN 1-55937-937-5.

36. Ларионов В.П., Колечицкий Е.С., Шульгин В.И. Расчет вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту//Электричество. –1981. –№5. –с.19-23.

37. Базелян Э.М. Влияние рабочего напряжения на вероятность прорыва молнии к проводам воздушных линий//Электричество. –1981. –№5. –с.24-27.

38. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. – М.: Вид-во НТК “Электропроект”, 2000. –68 с.

39. Аронов М.А., Аношин О.А., Кондратов О.И., Лопухова Т.В. Ограничители перенапряжений в электроустановках 6-750 кВ. Методичний та справочний посібник. Під ред. М.А. Аронова. –М.: Вид-во “Знак”, 2001. –240 с. –ISBN 5-87789-013-1.

40. Лисков Ю.И., Антонова Н.П., Максимов В.М., Демна О.Ю. Проблемы применения нелинейных ограничителей перенапряжений 110-750 кВ//Электрические станции. –1988. –№ 9. –с.43-47.

41. Дмитриев М.В. Оценка защищенности оборудования подстанций от грозовых перенапряжений и анализ требований ПУЭ в части расстановки защитных аппаратов//Сборник докладов научно-технической конференции «Нелинейные ограничители перенапряжений: производство, технические требования, методы испытаний, опыт эксплуатации, контроль состояния», СПб.: Вид-во ЦЕНК Минтопэнерго РФ, 2005. –164 с.

42. Гумерова Н.И. Проектирование грозозащиты ОРУ станций и подстанций//Збірник доповідей 8-ї науково-технічної конференції з електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки «EMC-2004». – СПб., 2004. –с.69-74.