

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Лежнюк П. Д.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття ступеня «магістра»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ ЗАХИСТУ  
ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ВІД ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ**

08-13.МКР.015.00.108 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу ОППП магістр,  
групи ЕСМ-18м  
галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
спеціальності 141 – «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
освітня програма «Електричні системи і  
мережі»  
Ткаченко А.Е. \_\_\_\_\_

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС

Собчук Н. В. \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Рецензент: \_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Вінниця – 2020 року



## ЗМІСТ

Анотація.....	5
Annotation.....	6
Вступ.....	7
1 Перенапруги та їх дослідження.....	10
1.1 Перенапруги в ізоляції ПЛ.....	10
1.2 Розряд блискавки в фазний провід ПЛ.....	19
2. Застосування обмежувачів перенапруг для захисту ізоляції ПЛ.....	26
2.1. Конструкція і принцип дії обмежувачів перенапруг .....	26
2.2 Обмежувачі перенапруг і грозові перенапруги на ПЛ.....	30
2.2.1 Місця установки обмежувачів перенапруг уздовж траси ПЛ.....	30
2.2.2 Місця установки обмежувачів перенапруг на одноланцюгових опорах.....	32
2.2.3 Встановлення обмежувачів перенапруг на багатоланцюгових опорах.....	36
2.3 Обмежувачі перенапруг і внутрішні перенапруги на ПЛ.....	40
2.4. Основні типи обмежувачів перенапруг і спосіб їх приєднання до ПЛ.....	42
2.5. Вибір характеристик обмежувачів перенапруг і оцінка ризику його пошкодження.....	46
2.6 Ефективність традиційних способів підвищення грозостійкості при ударі блискавки в опору або трос.....	50
2.7. Частота установки обмежувачів перенапруг уздовж траси ПЛ при ударі блискавки в фазний провід.....	55
2.8 Обґрунтування місць установки обмежувачів перенапруг на опорі ПЛ.....	59
3 Аналітичні методи дослідження перенапруг.....	66
3.1 Системи відносних одиниць при розрахунках перенапруг в електричних системах.....	66
3.2 Метод симетричних складових в розрахунках перенапруг.....	68
3.3 Параметри розрахункових схем у каналах прямої і нульової послідовностей.....	69
4 Дослідження перенапруг в діючих мережах.....	74

4.1	Вимірювання перенапруг в діючих мережах. Інформаційно-діагностичний комплекс „Регіна” .....	74
5	...Комутаційні перенапруги в електричних системах.....	80
5.1	Перенапруги при включенні лінії.....	80
5.2	Перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями.....	81
5.3	Перенапруги під час повторного включення лінії.....	84
5.4	Відновлювальні напруги при відключенні коротких замикань.....	86
6	Економічна частина.....	90
6.1	Опис ідеї проекту.....	90
6.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	93
6.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	94
7.	Охорона праці.....	98
7.1	Задачі розділу.....	98
7.2	Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою.....	98
7.3	Організаційно-технічні рішення з охорони праці під час виконання робіт під напругою.....	99
7.4	Розрахунок напруженості електричного поля.....	17
	Висновки.....	21
	Література.....	23
	Додаток А Технічне завдання	
	Додаток Б Розрахунок числа грозових вимкнень одноланцюгової ПЛ	
	Додаток В Розрахунок в інформаційно-діагностичному комплексі „Регіна”	
	Додаток Г Розрахунок напруженості електричного поля	

## АНОТАЦІЯ

Ткаченко А.Е. «Дослідження пристроїв обмеження перенапруг для захисту ізоляції повітряних ліній від грозових перенапруг». Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. 2020.– 110 с. Бібліогр.: 14. Іл.: 20. Табл.: 22.

Проаналізовано ефективність застосування обмежувачів перенапруг для захисту ізоляції ліній електропередач, визначена залежність підвищення грозостійкості від місць встановлення обмежувачів перенапруг, розглянуто принцип примусового обмеження кратності перенапруг до оптимального за техніко-економічних умов, принципи побудови системи обмеження перенапруг в проектних рішеннях, проведено аналіз розрахункових схем і видів перенапруг, засобів для обмеження перенапруг в електропередачах.

Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на персонал, що працює з високовольтним обладнанням.

Ключові слова: обмежувач перенапруг, грозостійкість, обмеження кратності перенапруг.

## ANNOTATION

Tkachenko A.E. "Investigation of overvoltage limiting devices to protect the insulation of overhead lines from lightning surges." Master's qualification work. - Vinnytsia: VNTU. 2020.– 110 p. Bibliogr .: 14. Il .: 20. Tabl .: 22.

The efficiency of overvoltage limiters for protection of insulation of power lines is analyzed, the dependence of lightning resistance increase on places of installation of overvoltage limiters is determined, the principle of forced limitation of surge multiplicity to optimal under technical and economic conditions is considered. overvoltages, means for limiting overvoltages in power transmission.

The analysis of dangerous and harmful factors influencing the personnel working with the high-voltage equipment is carried out.

Keywords: overvoltage limiter, lightning resistance, overvoltage multiplicity limitation.

## ВСТУП

Актуальність теми. Джерелом грозових перенапруг на ізоляції повітряних ліній можуть бути прямі розряди блискавки в повітряну лінію (в опору, в блискавкозахисний трос, в фазний провід), і приведена напруга від розрядів блискавки в об'єкти біля ПЛ. Для забезпечення необхідного рівня грозостійкості ПЛ використовують поєднання традиційних засобів блискавкозахисту: установку одного або декількох блискавкозахисних тросів, зниження опору заземлення опор, посилення ізоляції.

Через високі значення опору заземлення опор ПЛ, високий питомий опір ґрунту, неможливість застосування блискавкозахисних тросів, високі вітро-ожеледні навантаження традиційні засоби грозозахисту не забезпечують необхідну грозостійкість ПЛ. Тоді ефективним способом підвищення грозостійкості може стати установка на опорах ПЛ так званих «підвісних» обмежувачів перенапруг.

Із зростанням номінальної напруги і дальності електропередач, а також у зв'язку з успіхами в обмеженні атмосферних перенапруг внутрішні перенапруги починають грати все більшу роль у встановленні рівнів ізоляції електричних установок. Проведені останніми роками рядом організацій в Україні і за кордоном докладні дослідження внутрішніх перенапруг різного виду дозволили виявити основні комутаційні і аварійні режими, що супроводжуються появою перенапруг.

Експериментальним і теоретичним дослідженням перенапруг і засобів їх обмеження присвячено велику кількість робіт вчених з України, Російської федерації, США, Канади, Швейцарії, Польщі та інших країн. Таким чином, дослідження обмеження внутрішніх перенапруг в електропередачах, які виконано у роботі, є актуальними.

### Мета і задачі дослідження.

Метою магістерської роботи є розробка принципів побудови системи обмеження перенапруг, пропозиція заходів для обмеження перенапруг, аналіз їх реалізації в електропередачі України, перспективи глибшого обмеження перенапруг.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані такі основні завдання:

- аналіз принципу примусового обмеження кратності перенапруг до оптимального за техніко-економічних умов;
- дослідження принципів побудови системи обмеження перенапруг в проектних рішеннях;
- аналіз розрахункових схем і видів перенапруг;
- дослідження засобів для обмеження перенапруг в електропередачах;
- аналіз системи обмеження перенапруг, реалізованої для електропередачі України.

Об'єктом дослідження магістерської роботи є грозові, комутаційні і резонансні перенапруги в електропередачах.

Предметом дослідження є методи і засоби для обмеження перенапруг до припустимого рівня.

Методи дослідження. Для аналізу і розв'язання поставлених задач використано метод симетричних складових, зокрема розрахунок на основі комплексних заступних схем. Параметри схем по каналам прямої і нульової послідовності визначені для спектру частот до  $10^4$  Гц. Заступні схеми ліній Т або П-подібні, на основі рівнянь довгих ліній. Використано програму аналізу інформаційно-діагностичного комплексу «Регіна».

Апробація роботи. Тези роботи доповідались на науково-технічній конференції ВНТУ в березні 2019 року.



## 1 ПЕРЕНАПРУГИ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1 Перенапруги в ізоляції ПЛ

У нормальному режимі напруга на ізоляції обладнання не повинна підвищуватися понад найбільшого робочої напруги  $U_{нр}$ . Будь-яке перевищення миттєвим значенням напруги на ізоляції амплітуди найбільшої робочої напруги  $\sqrt{2}U_{нр}$  прийнято називати перенапругою.

Залежно від причин виникнення розрізняють (рис.1.1) дві групи перенапруг [2]: зовнішні і внутрішні. Зовнішні перенапруги є наслідком впливу зовнішніх по відношенню до даної мережі джерел енергії (наприклад, при розрядах блискавки). Внутрішні перенапруги розвиваються за рахунок процесів, обумовлених функціонуванням електричної мережі, мають місце при несприятливій конфігурації мережі, а також внаслідок роботи комутаційних апаратів або пошкодженнях ізоляції.

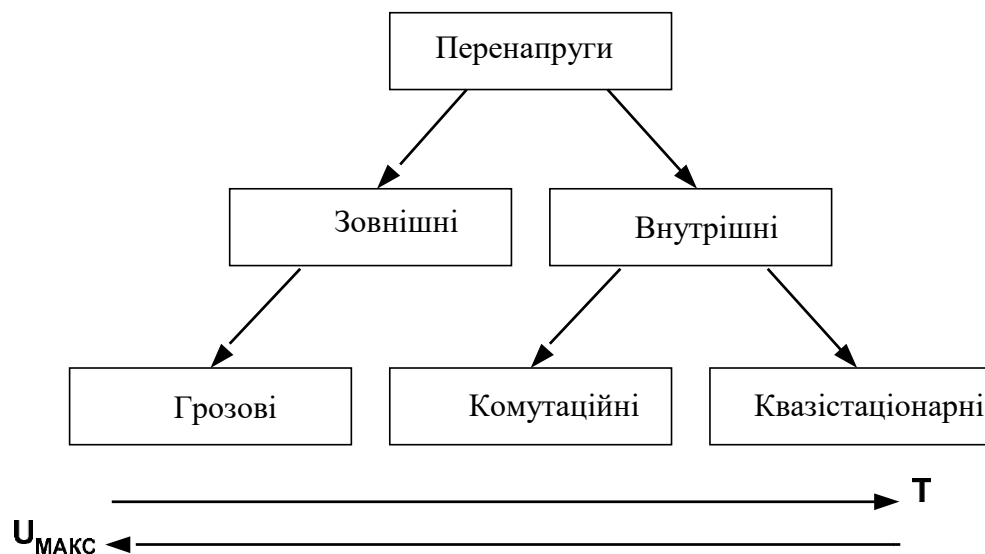


Рисунок 1.1. Спрощена класифікація перенапруг.

Перенапруги характеризують з точки зору їх максимальної величини  $U_{\text{макс}}$  і одного або декількох часових параметрів  $T$ :

- тривалості аперіодического імпульсу напруги;
- періоду коливань напруги;
- тривалості існування підвищення напруги.

Різні види перенапруг мають тимчасові параметри  $T$  від одиниць мікросекунд до декількох годин. У більшості випадків перенапруги мають короткочасний характер, так як вони виникають при швидко згасаючих перехідних процесах або в аварійних режимах, час існування яких обмежується дією релейного захисту та автоматики. Навіть самі короткочасні перенапруги здатні привести до пробою або перекриття ізоляції та пов'язаної з цим необхідністю подальшого відключення пошкодженого елемента мережі, тобто до перерв в електропостачанні споживачів або зниженням якості електроенергії. Перенапруги впливають і на міжфазних ізоляцію, і на ізоляцію фаз щодо землі. Найбільше практичне значення мають перенапруги на фазах щодо землі. Вони впливають на ізоляцію, яка відокремлює струмопровідні частини електрообладнання від землі і заземлених конструкцій.

У цьому випадку на рис.1.2 під величиною  $U_{НР}$  слід розуміти фазне значення найбільшої робочої напруги мережі.

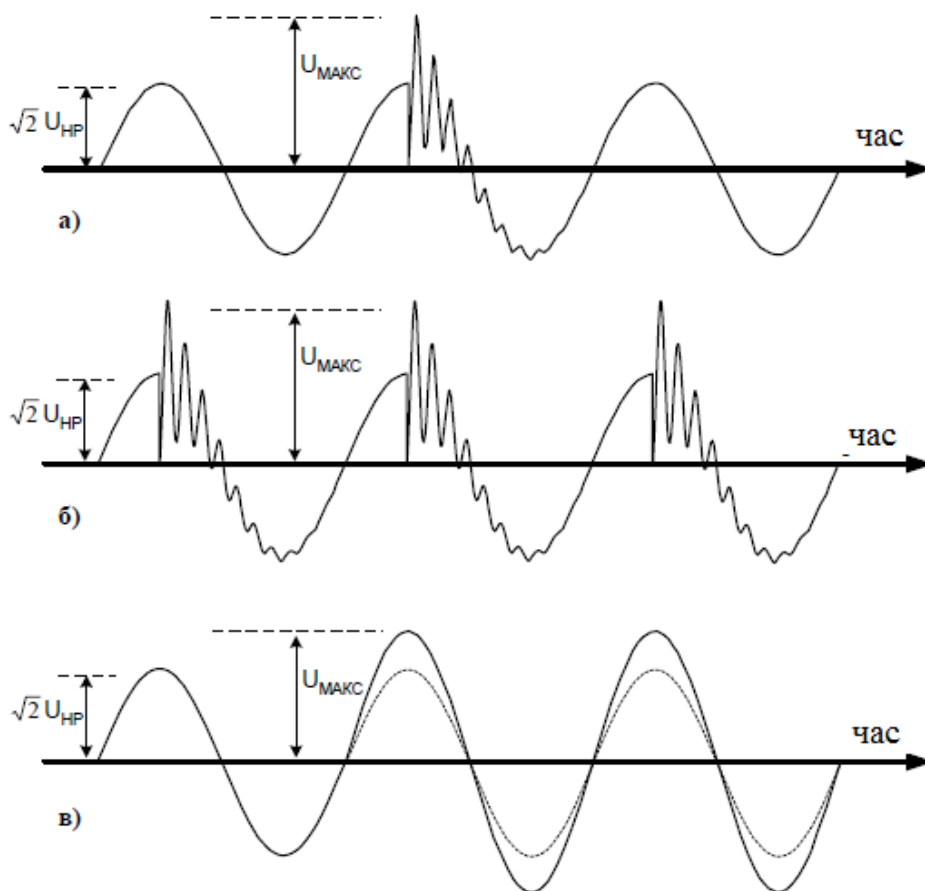


Рисунок 1.2. Приклади перенапруг різної форми і часових параметрів

Для обраної точки мережі інтервал часу між імпульсними грозовими і / або імпульсними комутаційними перенапруженнями, що виникають в процесі експлуатації, як правило, досить великий, і тому їх можна вважати однократними (рис.1.2, а). Навпаки, квазістаціонарних (як би стаціонарні) перенапруги характеризуються тим, що підвищення напруги повторюється багаторазово протягом цілого ряду періодів промислової частоти: на рис.1.2, б - це імпульсні спотворення напруги промислової частоти, на рис.1.2, в - це підвищення величини самої напруги промислової частоти.

На рисунку 1.1 показано, як змінюються тимчасові параметри і рівні перенапруг в залежності від їх виду. Для грозових процесів характерні дуже високі перенапруги при малій тривалості впливу на ізоляцію, для квазістаціонарних - багаторазові впливу на ізоляцію при відносно невеликій величині перенапруг.

При відомій величині і формі перенапруг ступінь їх небезпеки для даної ізоляції визначається її вольт-секундною характеристикою (рис.1.3), в якості якої можна розуміти залежність 50% розрядної напруги  $U_{50\%}$  від часу  $T$ , що пройшов з початку прикладення напруги до розвитку розряду. Якщо точка, що відповідає параметрам  $U_{\text{МАКС}}$  і  $T$  перенапруг буде вищою вольт-секундною характеристикою (рис.1.3), то велика ймовірність перекриття (пробою) ізоляції.

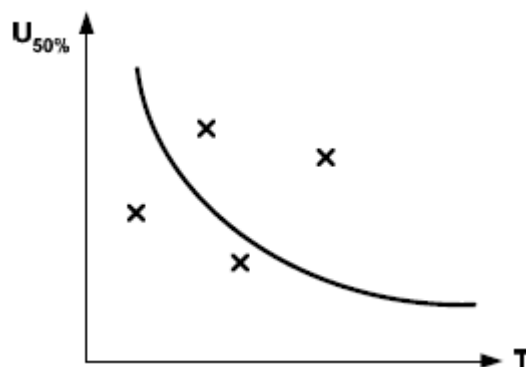


Рисунок 1.3. Загальний вигляд вольт-секундної характеристики ізоляції обладнання, а також різні поєднання величини перенапруг і їх тривалості («хрестики»).

В процесі експлуатації відключення повітряних ліній може бути

викликано різними причинами, однією з яких є перекриття ізоляції внаслідок перенапруг, що впливають на ізоляцію фазних проводів. Як правило, при перенапруженнях на повітряних лініях мова йде саме про перекриття ізоляції, а не про пробої. Іншими словами, при перекритті ізоляції працездатність ізоляції (і ПЛ в цілому) з високою ймовірністю може бути відновлена після проходження циклу автоматичного повторного включення, тоді як при пробі ізоляції АПВ буде неуспішно, і лінію потрібно виводити в ремонт.

При перенапругах перекриття ізоляції ПЛ найбільш вірогідні на опорах, оскільки там виявляється мінімальним відстань від проводів до заземлених конструкцій (траверс і стійок опори), яке визначається класом напруги лінії, застосовуваними типами опор і ізолюючих підвісок (ізоляторів) фазних проводів.

Ймовірність перекриття ізолюючої підвіски визначається багатьма факторами і, в тому числі, величиною і формою впливають перенапруг. Зовнішні (грозові) і внутрішні (комутаційні, квазістаціонарних) перенапруги володіють різними параметрами, але досвід експлуатації, випробування і розрахунки показують, що з усіх перенапруг причиною перекриття ізоляції найбільш часто стають грозові перенапруги. Саме тому узагальнене поняття «захист ізоляції ПЛ від перенапруг» нерідко ототожнюють з його окремим випадком: «захистом ізоляції ПЛ від грозових перенапруг»

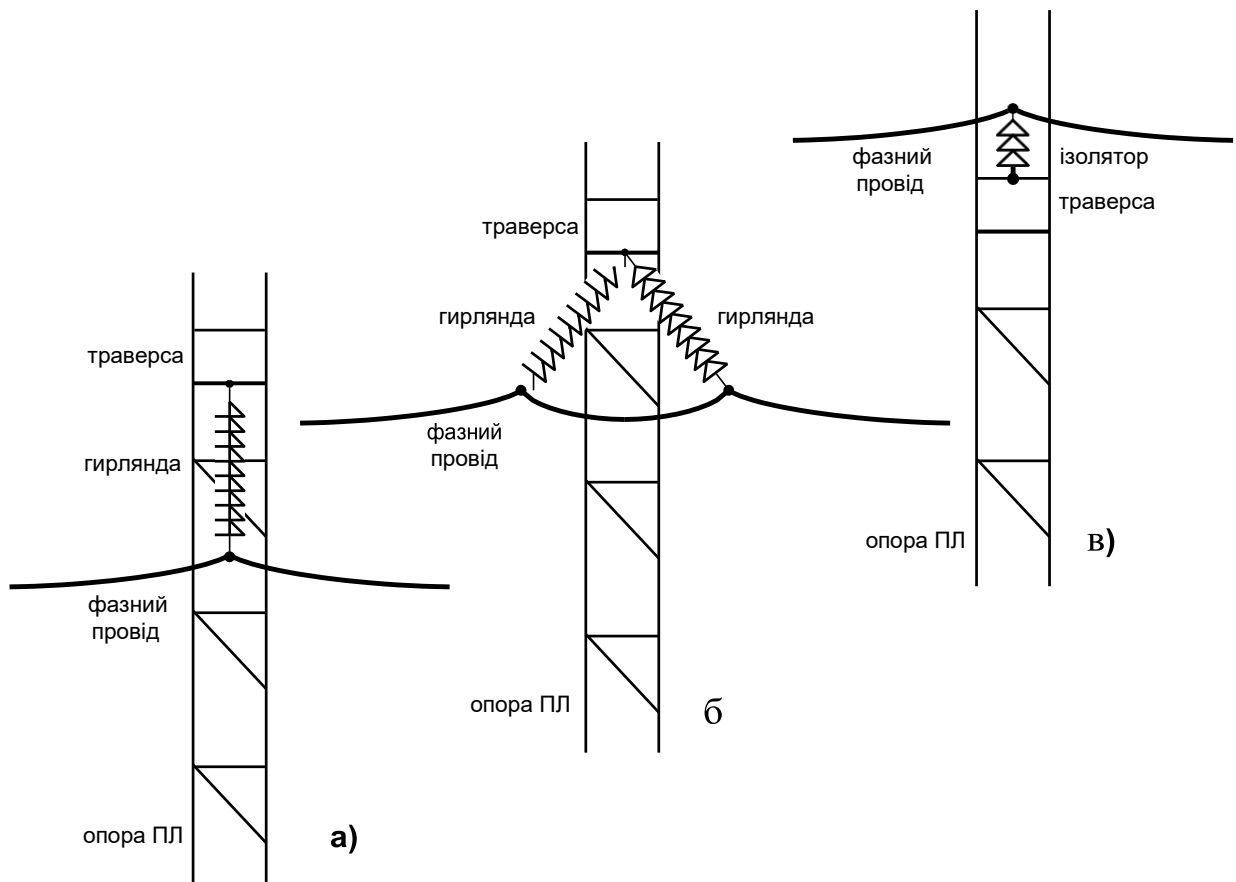


Рисунок 1.4. Найбільш поширені ізолюючі підвіски фазних проводів ПЛ 6-750 кВ: підвісна (а) і натяжна (б) гірлянди ізоляторів; штирьовий ізолятор (в).

Перенапруги є лише однією з причин порушення нормальної роботи повітряних ліній і їх відключення. Також причинами є:

- перекриття зволоженою ізоляцією під робочою напругою;
- «пташині» відключення (перекриття забрудненої ізоляції, перекриття по струменю посліду, перекриття через великих птахів);
- перекриття на дерева;
- перекриття ізоляції при лісових та степових пожежах;
- пробую ізоляції;
- розстріл ізоляції мисливцями;
- обрив фазних проводів і тросів (з падінням на фазні дроти) через

вібрації, нерозрахованих вітрових і ожеледних навантажень;

- падіння опор через нерозрахованих вітрових і ожеледних навантажень;
- наїзд техніки на ПЛ (обрив проводів і тросів, падіння опор);
- інші причини

Число відключень ПЛ через вплив грозових перенапруг залежить від ряду факторів [2,3], таких як:

- число розрядів блискавки в ПЛ і поряд з нею;
- імпульсна міцність ізоляції ПЛ;
- імпульсний опір заземлення опор ПЛ;
- наявність блискавкозахисних тросів (їх число і розташування щодо фазних проводів);
- наявність на ПЛ спеціальних засобів для обмеження перенапруг (наприклад, обмежувачів перенапруг нелінійних ОПН).

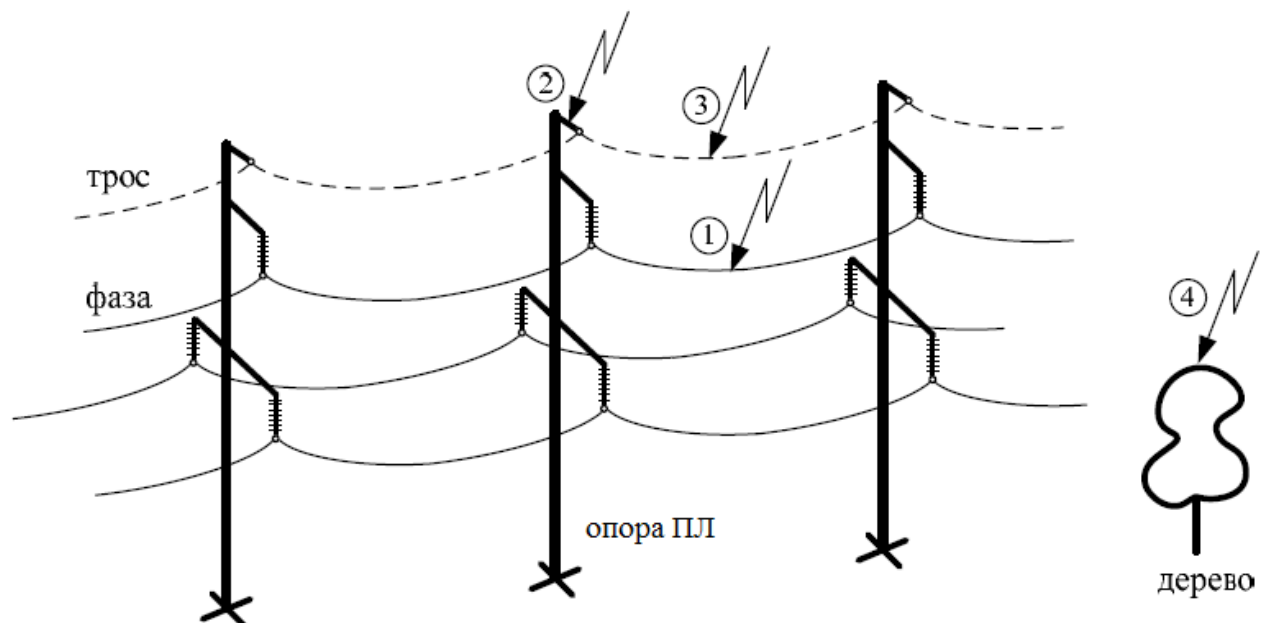


Рисунок 1.5. Розряди блискавки - причини грозових перенапруг на ізоляції

Основними джерелами грозових перенапруг на ізоляції ПЛ, як це показано на рис.1.5, є наступні дії блискавки:

- прямі розряди в ПЛ (в фазний провід - 1, в опорі - 2, в трос - 3);

- розряди поблизу від ПЛ (в землю або в якісь об'єкти - 4).

У випадках 1,2,3 кажуть, що на ізоляції ПЛ мають місце перенапруги прямого розряду блискавки, а в разі 4 - індуктуються перенапруги. Фізика блискавки краще відповідає «розряд», проте найчастіше використовується «удар».

При заданих параметрах блискавки перенапруги прямого розряду небезпечніше для ізоляції, ніж індуктуються перенапруги. Однак імовірність прямого розряду блискавки ПЛ залежить від багатьох факторів, і може вийти так, що зовсім не прямі розряди блискавки є основною причиною перекриття ізоляції при грозових перенапруженнях, а індуктуються. Зокрема, така ситуація складається в мережах 6-10 кВ, де висота опори невелика і траса ПЛ добре екранується рельєфом місцевості, лісом і будівлями, тобто ПЛ 6-10 кВ не є привабливою для формування на неї розряду блискавки. Тому в мережах 6-10 кВ основною причиною грозових відключень ПЛ вважаються індуктуються перенапруги при близьких до траси лінії розрядах блискавки.

Існують різні методики для оцінки числа розрядів блискавки в ПЛ, оцінки числа розрядів в елементи її конструкції (точки 1,2,3 на рис.1.5). Реальне число розрядів блискавки в ПЛ залежить від багатьох факторів, не всі з яких можна врахувати при проведенні розрахунків, тобто слово «розрахунок» коректніше замінити словом «оцінка».

При оцінках числа розрядів блискавки в ПЛ основні традиційно враховуються фактори такі:

- грозова активність в районі проходження ПЛ, що виражається або середнім числом розрядів блискавки на одиницю площі земної поверхні (на 1 км<sup>2</sup>), або так званім річним «числом днів з грозою», або так званім річним «числом грозових годин»;

- площа, яку займає лінією (залежить від довжини ПЛ і ширини її траси, яка в свою чергу залежить від типу опор);

- висота опор, що визначає «тінь», що відкидається лінією (розряди

блискавки в землю можливі лише на деякому віддаленні від траси ПЛ, так як в протилежному випадку їх можна вважати прямими розрядами в ПЛ).

Фактори, які складно врахувати при оцінках конкретного числа розрядів блискавки в ПЛ, описані в теорії виборчого врізання [19,20]:

- наявність по трасі окремих високих опор;
- переходи ПЛ через водні перешкоди;
- перетину ПЛ з іншими ПЛ;
- вигини траси ПЛ і вигини йдуть паралельно ліній або трубопроводів;
- місця по трасі, де змінюється характер ґрунту і рівень ґрунтових вод;
- характер місцевості (ліс / поле / гори) і наявність будівель.

З огляду на викладене, існуючими методиками можна більш менш довіряти лише в разі їх використання для довгих, порівняно високих і габаритних ПЛ 35-750 кВ, число розрядів в які не сильно залежить від характеру місцевості, як для ПЛ 6-10 кВ.

## 1.2 Розряд блискавки в фазний провід ПЛ

На рис.1.6-1.7 показані різні конструкції опор ПЛ 6-750 кВ і відзначені фази, в які найбільш вірогідні розряди блискавки:

- в будь-які проводи для досить компактних ПЛ 6-10 кВ;
- в верхні проводи при розташуванні фаз в вершинах трикутника або при вертикальному розташуванні фаз;
- в крайні проводи при горизонтальному розташуванні фаз.

Для інших фаз ймовірність розряду блискавки є, але вона помітно нижче і, іноді, прориви блискавки на них взагалі не беруться до уваги.



Таблиця 1.1. Типові опори ПЛ 6-750 кВ і область їх застосування.

ескіз опори	класи напруги лінії	можливість установки тросу	Розташування фаз
Рис.1.6, а	6-10 кВ	немає	в вершинах трикутника
Рис.1.6, б			горизонтальне
Рис.1.7, а	35-330 кВ	є	в вершинах трикутника
Рис.1.7, б			вертикальне
Рис.1.7, в	35-750 кВ		горизонтальне

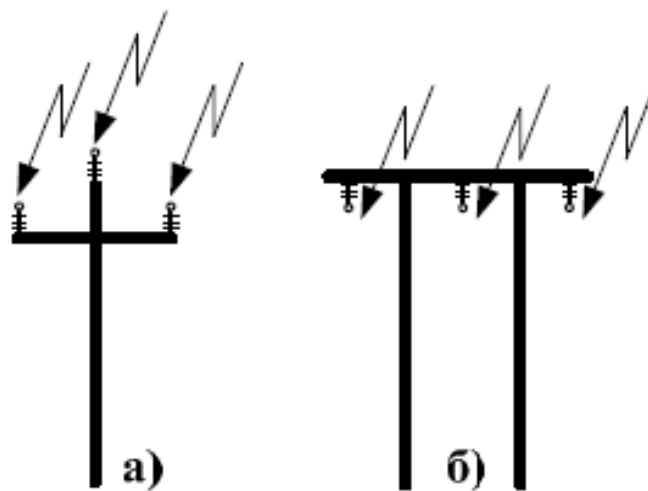


Рисунок 1.6. Фазні проводи ПЛ 6-10 кВ, в які найбільш імовірні прямі розряди блискавки.

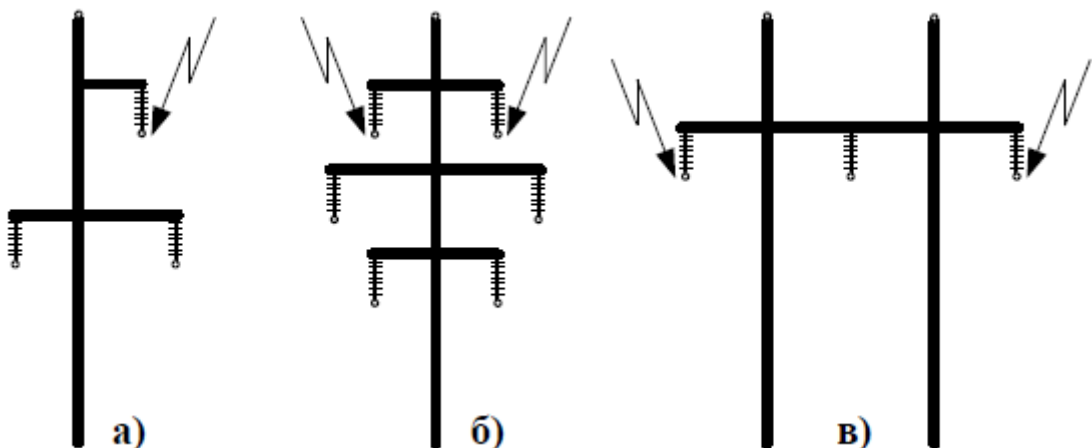


Рисунок 1.7. Фазні проводи ПЛ 35-750 кВ, в які вірогідні прямі розряди блискавки.

При розряді блискавки  $i_M(t)$  в фазний провід струм блискавки (хвиля

струму) буде поширюватися вліво і вправо від місця розряду (рис.1.8-1.9):

$$u_{\phi}(t) = \frac{Z_{\phi}}{2} \cdot i_M(t),$$

де  $Z_{\phi}$  - хвильовий опір фазного проводу [2].

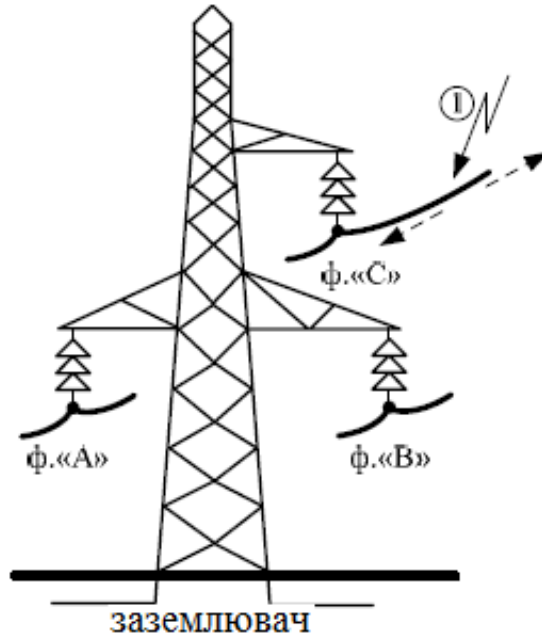


Рисунок 1.8. Розряд блискавки в фазний провід ПЛ та шляхи розтікання струму блискавки.

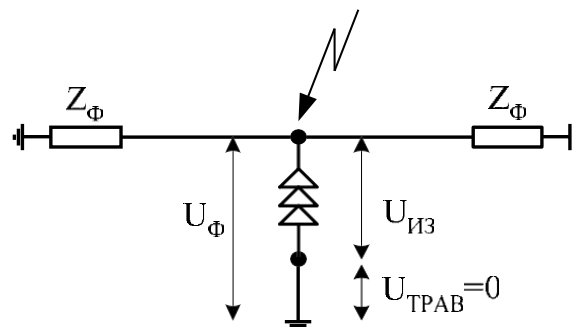


Рисунок 1.9. Спрощена схема заміщення для визначення грозових перенапруг на ізоляції ПЛ в умовах рис.1.8 при розряді блискавки в фазний провід.

При спрощеному аналітичному дослідженні кількості відключень ПЛ важливе співвідношення перенапруг і міцності ізоляції, що визначає наявність або відсутність перекриття. Оскільки такі за перекриттям процеси

зараз не так важливі, то досить розглядати «необмежені» грозові перенапруги, тобто без урахування перекриттів ізоляції.

Струм в опорі і її заземлювальному пристрої з'явиться лише при перекритті ізоляції фази «С», ураженої блискавкою. Отже, для оцінки необмежених перенапруг, що існують до перекриття ізоляції, досить вважати потенціал траверси фази «С» рівним нульовому потенціалу землі  $u_{\text{ТРАВ}}(t) = 0$ . Тоді напруга на ізоляції фазного проводу, рівна різниці потенціалів фазного проводу  $u_{\phi}(t)$  і траверси опори  $u_{\text{ТРАВ}}(t)$ :

$$u_{\text{ИЗ}}(t) = u_{\phi}(t) - u_{\text{ТРАВ}}(t) = \frac{Z_B}{2} \cdot i_M(t)$$

Умовою перекриття ізоляції ПЛ можна вважати  $u_{\text{ИЗ}}(t) > u_{\text{ИМН}}$ , тобто певне перевищення грозовими перенапругами імпульсної міцності ізоляції (або 50% розрядної напруги).

Навіть якщо імпульсний струм  $i_M(t)$  блискавки має максимальне значення всього  $I_M = 10$  кА, то при деякому середньому значенні хвильового опору фазного проводу  $Z_B = 400$  Ом отримаємо, що максимальна напруга на ізоляції досягне  $U_{\phi} = 2000$  кВ і виявиться достатнім для перекриття ізоляції ПЛ всіх класів номінальної напруги до 330 кВ (див. табл.1.2).

З огляду на дані по величинам струмів блискавки [1,2], прямий розряд блискавки в фазний провід ПЛ будь-якого класу напруги з високою ймовірністю призведе до перекриття її ізоляції і зажадає вимкнення ПЛ.

Табл.1.2. будівельна довжина  $L_3$  гірлянди ізоляторів ПЛ 6-750 кВ і її розрядна напруга  $U_{50\%}$  при впливі стандартного грозового імпульсу 1.2 / 50 мкс.

$U_{\text{НОМ}}$ , кВ	6-10	35	110	220	330	500	750
$L_3$ , м	0.1-0.2	0.7	1.25	2.3	3.0	4.0	6.0
$U_{50\%}$ , кВ	80-180	500	750	1300	1850	2350	2900

Оскільки прямі розряди блискавки в ПЛ найбільш вірогідні для ліній 35-750 кВ, що піднімаються над місцевістю і «приваблюють» для блискавки,

то відчутне підвищення грозоупорності ПЛ 35-750 кВ досягається установкою над фазними проводами блискавкозахисних тросів, приєднаних до опор ПЛ.

Для ізоляції ПЛ 35-750 кВ перенапруги не становлять небезпеки, а головна мета установки троса - перерозподіл розрядів блискавки з струмоведучих на заземлені частини ПЛ (рис.1.10).

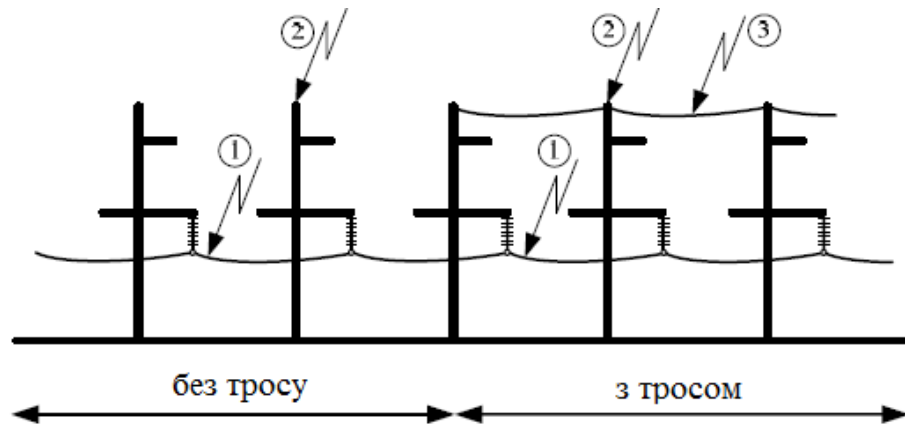


Рисунок 1.10. Основні місця розряду блискавки в ПЛ 35-750 кВ з тросом і без нього.

Якщо прийняти число розрядів блискавки в ПЛ рівним одиниці, то загальне уявлення про частки розрядів блискавки в точки 1,2,3, показані на рис.1.10, можна отримати, ознайомившись з табл.1.3, складеної з використанням ряду методик [2,3 і ін]. Видно, що установка троса знижує ймовірність розрядів блискавки в фазні дроти в сотні разів, приводячи в ряді випадків до відчутного підвищення грозостійкості повітряних ліній 35-750 кВ.

Табл.1.3. Частки розрядів блискавки в різні елементи повітряної лінії рис.1.5.

Точка	Місце розряду блискавки	троса немає	встановлено трос
1	фазний провід	0.5	0.005
2	опора (або трос поблизу від опори)	0.5	≈ 0.5
3	трос в середній частині прольоту	-	≈ 0.5
Разом		1.0	1.0

Якщо трос безпосередньо приєднаний до кожної опори, то в замкнених контурах, показаних пунктиром на рис.1.11, а, в нормальному режимі роботи ПЛ будуть протікати паразитні струми промислової частоти, викликані перемінним магнітним полем струмів фазних проводів, і що призводять до збільшення втрат потужності ПЛ, корозії тросів. Тому для боротьби з паразитними струмами на практиці приєднання тросів до опор здійснюється через ізолятори - наприклад як показано на рис.1.11, б.

У нормальному режимі роботи контури для протікання паразитних струмів виявляються роз'єднаними, однак при розрядах блискавки в опори і троси ПЛ зазначені ізолятори легко перебиваються, приєднуючи троси до заземленим опор і забезпечуючи стікання струмів блискавки через тіло опори в її заземлюючих пристроїв.

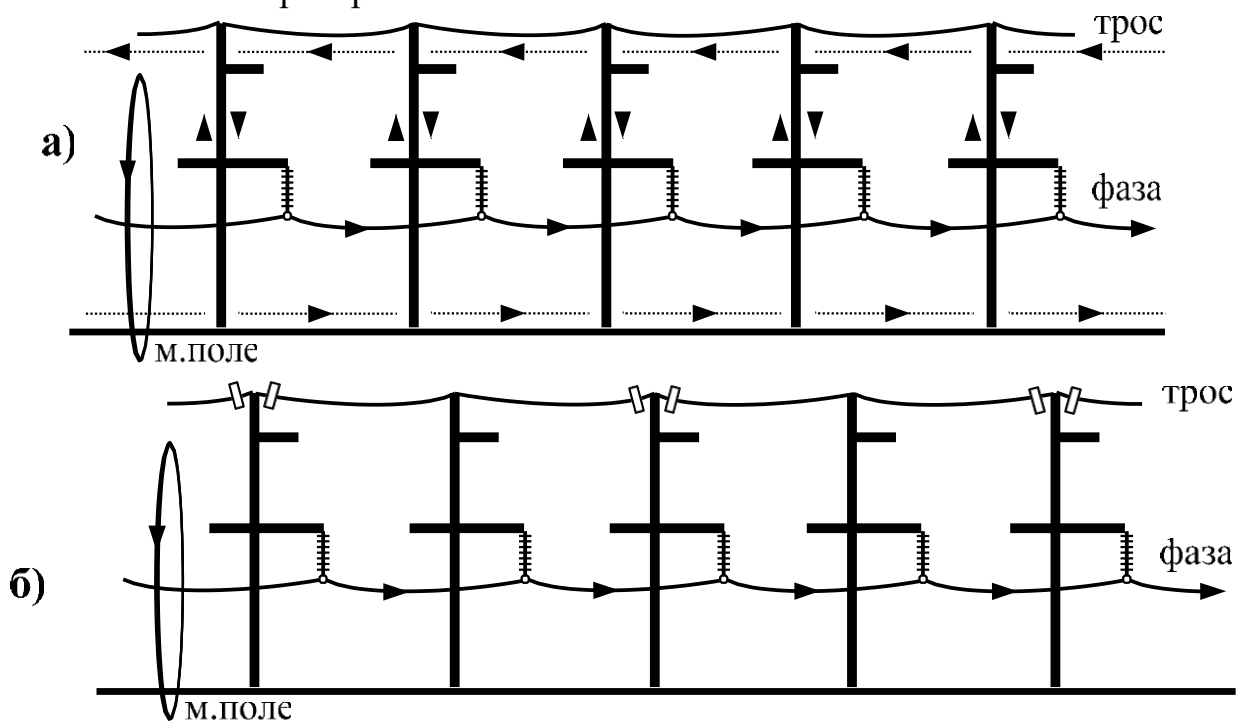


Рисунок 1.11. Різні способи кріплення троса до опор ПЛ: глухе (а), через ізолятори (б).

На ПЛ 35-750 кВ ефективність тросової захисту визначається тим, наскільки низька імовірність прориву блискавки на фазні проводи. Ця ймовірність залежить від ряду факторів: числа тросів, кута тросової захисту.

Загальні способи зниження грозових перенапруг

Традиційні способи зниження грозових перенапруг на ізоляції повітряної лінії (підвищення грозоупорності ПЛ) припускають:

- підвищення імпульсної міцності ізоляції ПЛ;
- зниження імпульсного опору заземлення опор;
- установку блискавкозахисних тросів як над проводами, так і під ними.

Для кожного класу номінальної напруги ПЛ існують традиційні рішення: типова ізоляція, заземлюючих пристроїв, число тросів (0,1,2). Якщо для конкретної ПЛ не вдається реалізувати традиційні рішення (вони за результатами розрахунків та на практиці не забезпечують бажаного рівня грозоупорності), то доводиться говорити про додаткові способи зниження числа грозових вимкнень - про так званих нетрадиційних методах, як правило, передбачають установку на опорах ПЛ спеціальних захисних пристроїв того чи іншого типу, найбільш поширені серед яких:

- обмежувачі перенапруг нелінійні (ОПН) з зовнішнім іскровим проміжком і без нього;
- іскрові розрядники.

Поділ заходів підвищення грозостійкості на традиційні і нетрадиційні умовно. Все більша кількість ПЛ оснащується обмежувачами перенапруг.

Зменшення перенапруг необхідне для:

- для місць з ослабленою міцністю ізоляції;
- для високих опор;
- для погано заземлених опор;
- для ділянок траси ПЛ, на яких немає троса;
- для перетинів з ПЛ вищого класу напруги.

## 2. ЗАСТОСУВАННЯ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ ЗАХИСТУ ІЗОЛЯЦІЇ ПЛ

Для забезпечення надійності електропостачання споживачів в умовах недостатньої грозоупорності повітряних ліній є два основних шляхи:

- застосовувати на вже побудованих лініях «традиційні» і «Нетрадиційні» кошти підвищення грозоупорності;
- розвивати системи електропостачання, тобто будувати додаткові лінії.

На стадії проектування ПЛ розрахункове число відключень через грозові перенапруг знижують традиційними способами - зменшуючи імпульсний опір заземлення опор, застосовуючи блискавкозахисні (грозозащитные.Подвесные) троси, знижуючи висоту опор (застосування залізобетонних опор замість металевих), збільшуючи імпульсну міцність лінійної ізоляції.

У ряді випадків традиційні способи підвищення грозостійкості ПЛ виявляються неефективними через несприятливі геофізичних умов (високий питомий опір ґрунтів) або метеоумов (високі ожеледно-вітрові навантаження для тросів). У подібних ситуаціях необхідно використовувати нетрадиційні способи підвищення грозостійкості ПЛ, які мають доповнити традиційні.

Нетрадиційним способом підвищення грозостійкості ПЛ всіх класів номінальної напруги є використання обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН), як ефективного зниження числа відключень ПЛ, через грозові перенапруги. Підвищення грозостійкості ПЛ за допомогою установки на опорах «підвісних» ОПН підтверджується науковими дослідженнями і досвідом експлуатації.

### 2.1. Конструкція і принцип дії обмежувачів перенапруг

Для захисту устаткування розподільчих пристроїв від грозових і комутаційних перенапруг традиційно використовувалися вентиляльні розрядники (РВ). Конструкція розрядників передбачала наявність нелінійних опорів і послідовно включеного іскрового проміжку, необхідного для виключення тривалого впливу на опору робочої напруги мережі.

Після того, як технологія виробництва нелінійних елементів вийшла на новий рівень, виявилося можливим допускати тривалий вплив на опору робочої напруги мережі без погіршення їх захисних властивостей. Одночасне використання нових високонелінійних опорів і відмова за непотрібністю від іскрових проміжків - ось основні особливості сучасних захисних апаратів від грозових і комутаційних перенапруг, які отримали назву обмежувачів перенапруг.

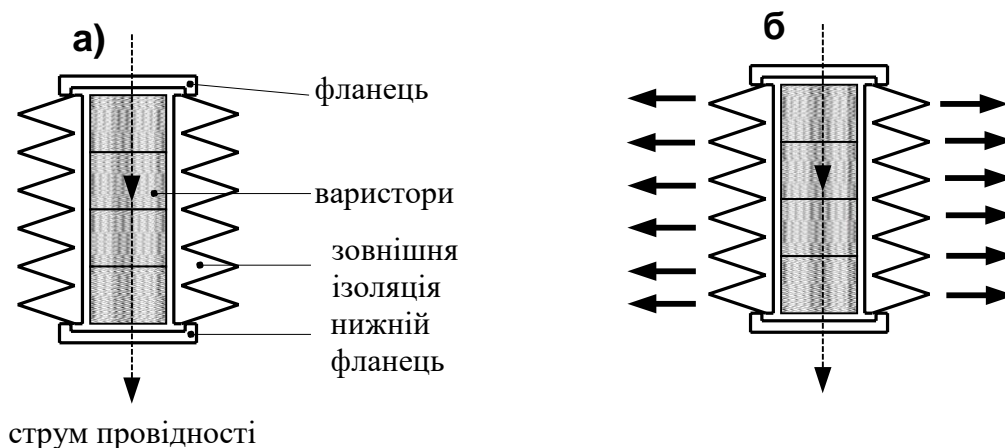


Рисунок 2.1. Основні частини конструкції ОПН і принцип його роботи.

Найважливішими частинами конструкції обмежувачів перенапруг є показання на рис.2.1, а нелінійні елементи (варистори), зовнішня ізоляція, верхній і нижній фланці.

Принцип роботи обмежувачів перенапруг побудований на різко нелінійної вольтамперной характеристикі варисторів, тобто нелінійної залежності струму від напруги. У нормальному режимі при впливі на обмежувачів перенапруг фазного робочої напруги мережі в варисторах проходить струм провідності, величина якого становить частки міліампера. При виникненні перенапруг струм в варисторах різко зростає, а енергія перенапруг у вигляді тепла розсіюється в обмежувачів перенапруг і в ланцюзі його заземлення. Отже, для успішної безаварійної роботи обмежувачів перенапруг необхідно, щоб відведення тепла через його бічну поверхню (рис.2.1, б) був інтенсивніше процесу виділення тепла



в варисторах.

Інтервали часу між наступними один за одним грозовими і комутаційними перенапругами, як правило, цілком достатні для охолодження обмежувачів перенапруг і його переходу в початковий стан, коли температура варисторів дорівнює або трохи більше температури навколишнього середовища. Навпаки, квазістаціонарних перенапруги можуть призводити до багаторазових спрацьовувань обмежувачів перенапруг протягом малого інтервалу часу, недостатнього для охолодження варисторів. Саме тому кажуть, що обмежувачі перенапруг призначені для захисту ізоляції від грозових і комутаційних перенапруг, але не призначені для захисту від квазістаціонарних.

Відсутність в конструкції обмежувачів перенапруг іскрових проміжків і використання полімерної ізоляції дозволили максимально спростити і здешевити конструкцію обмежувачів перенапруг, зробити її вибухобезпечною, що зумовило широке застосування обмежувачів перенапруг в енергетиці.

Великі габарити і вага не давали можливості масово встановлювати РВ на повітряних лініях, тоді як легка і компактна конструкція сучасних обмежувачів перенапруг з полімерною ізоляцією зробила їх дуже привабливим для захисту ізоляції ПЛ.

Для захисту ПЛ необхідну кількість обмежувачів перенапруг може бути можна порівняти з числом опор лінії, а струмові і енергетичні характеристики підвісних обмежувачів перенапруг повинні бути не гірше, ніж у підстанційних апаратів. Незважаючи на це обмежувачів перенапруг вже знаходять і будуть все більше знаходити застосування на повітряних лініях, оскільки в ряді випадків альтернативи їм немає.

Вважається, що комутаційні перенапруги призводять до виділення в обмежувачів перенапруг енергій навіть більших, ніж при грозових перенапругах.

Нехай при включеннях і відключеннях ПЛ енергія накопичується в ємкості лінії, яка комутується:

$$W = \frac{CU_{\text{макс}}^2}{2}$$

$C=C \cdot l$  - ємність лінії, яка визначається через її довжину  $l$  і погонну  $C$

Перенапруги зручно характеризувати кратністю - ступенем перевищення перенапруженнями амплітуди фазного значення найбільшої робочої напруги мережі

$$K = U_{\text{макс}} / (\sqrt{2} \cdot U_{\text{НР}} / \sqrt{3})$$

де  $U_{\text{НР}}$  найбільша робоча напруга мережі.

Тоді

$$W = \frac{C^* \cdot l \cdot (K \cdot \sqrt{2/3} \cdot U_{\text{НР}})^2}{2}$$

Для зіставлення обмежувачів перенапруг різних класів напруги енергію краще оцінювати в відносних одиницях найбільшого робочої напруги обмежувачів перенапруг

$$W_{\text{уд}} = \frac{W}{U_{\text{НРО}}}$$

де  $W_{\text{уд}}$  - питома розсіяє енергія, яка за своєю суттю і розмірності (Кл) відповідає заряду, який пройшов через обмежувачів перенапруг. Остаточний вираз:

$$W_{\text{уд}} = \frac{C^* \cdot l \cdot K^2 \cdot U_{\text{НР}}}{3} \cdot \frac{U_{\text{НР}}}{U_{\text{НРО}}}$$

З виразу (2.1) видно, що питома енергія (заряд) комутаційних перенапруг пропорційна класу напруги  $U_{\text{НР}}$  і довжині лінії  $l$ .

Згідно (2.1), задавшись певною довжиною лінії  $l$ , можна показати, що в мережі 750 кВ ( $U_{\text{НР}} = 787$  кВ) комутаційні перенапруги мають питому енергію, яка більш ніж в 100 разів вище, ніж для мережі 6 кВ ( $U_{\text{НР}} = 7.2$  кВ).

Середня довжина ПЛ 750 кВ на порядок перевищує таку для ПЛ 6 кВ. Якби комутаційні перенапруги дійсно були визначальними при виборі обмежувачів перенапруг, то в мережах 6 кВ та в мережах 750 кВ були потрібні обмежувачів перенапруг з питомими енергіями, що відрізняються на три порядки.

Дійсно, в даний час промисловість випускає обмежувачів перенапруг 6 - 750 кВ з варисторами такого діаметру, що питома енергія кожного імпульсу змінюється в досить вузькому діапазоні  $W_{уд} = 1.5 \div 10.0 \text{кДж/кВ}$  відповідному діапазону значень прямокутних струмів  $I_{п} \approx 300 \div 2000 \text{ А}$ .

Досвід експлуатації показує, що такі обмежувачів перенапруг витримують вплив при комутаційних перенапругах навіть в мережах 330-750 кВ.

Вимоги до питомої енергії обмежувачів перенапруг:

- для обмежувачів перенапруг 6-220 кВ визначаються тільки грозовими перенапругами;
- для обмежувачів перенапруг 330-750 кВ визначаються грозовими перенапругами, а для довгих ліній - комутаційними перенапругами.

Помилково вважають, що обмежувачів перенапруг при установці на ПЛ повинні бути відбудовані від спрацьовувань при комутаційних перенапругах, пояснюючи це так:

- комутаційні перенапруги, володіючи помітною енергією, нібито витрачають ресурс варисторів обмежувачів перенапруг, встановлених по трасі ПЛ для захисту ізоляції від грозових перенапруг;
- для захисту ізоляції ПЛ від комутаційних перенапруг вже є спеціальні обмежувачів перенапруг, які розміщуються по кінцях ПЛ в розподільних пристроях.

Всі ці міркування щодо впливу комутаційних перенапруг на питання застосування підвісних обмежувачів перенапруг мають під собою ґрунт лише тоді, коли мова йде про встановлення на трасі ПЛ єдиного комплексу обмежувачів перенапруг 330-750 кВ, призначеного для захисту ізоляції якийсь із опор від грозових перенапруг. Однак, якщо для обмеження грозових перенапруг на трасі ПЛ встановлено кілька комплектів обмежувачів перенапруг 330-750 кВ, то навіть для довгих ПЛ комутаційні перенапруги перестають бути розрахунковими, оскільки їх енергія ділиться між багатьма обмежувачами перенапруг.

## 2.2 Обмежувачі перенапруг і грозові перенапруги на ПЛ

### 2.2.1 Місця установки обмежувачів перенапруг уздовж траси ПЛ

Якщо для конкретної ПЛ складно виявити несприятливі з точки зору грозових перекриттів ізоляції ділянки траси, конкретні неблагополучні місця і опори вздовж траси ПЛ, то тоді мова може йти про захист від грозових перенапруг усіх ділянок лінії. В такому випадку слід визначитися з тим, а як часто уздовж траси ПЛ треба встановлювати обмежувачів перенапруг: на кожній опорі (рис.2.2, а), через опору (рис.2.2, б), через дві опори та ін. Інакше кажучи, треба мати уявлення про захисній зоні гострої ниркової недостатності.

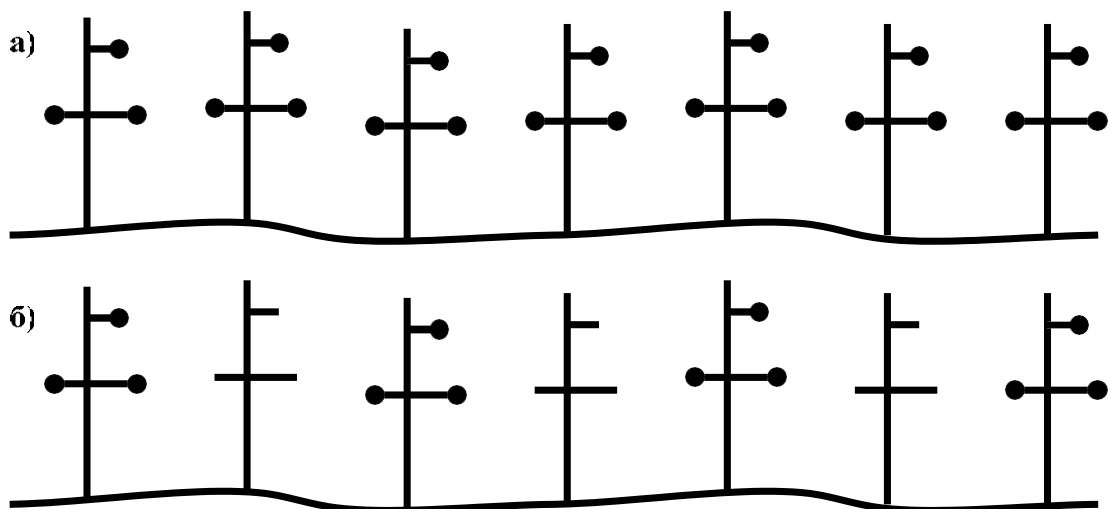


Рисунок 2.2. Розміщення обмежувачів перенапруг уздовж всієї траси ПЛ: (а) - на кожній опорі, (б) - через опору.

При установці обмежувачів перенапруг в розподільчому пристрої не допускають, щоб відстань по ошиновці від обмежувачів перенапруг до силового трансформатора, що захищається перевищувало кілька десятків метрів [27]. Таким чином, захисна зона обмежувачів перенапруг в розподільчому пристрої становить всього лише десятки метрів і тому не слід очікувати, що при установці обмежувачів перенапруг на опорі ПЛ він зможе захищати ізоляцію відразу багатьох опор, віддалених від гострої ниркової

недостатності на сотні метрів. Пробій ізоляції трансформатора і перекриття лінійної ізоляції ПЛ - це принципово різні події з точки зору економічного збитку. Крім того, в рамках заданого класу напруги розрядна напруга ізоляції ПЛ приблизно в 1.5 рази вище, ніж допустима напруга для внутрішньої ізоляції обладнання [28]. Проте, захисною зоною обмежувачів перенапруг на ПЛ можна вважати лише кілька сотень метрів і ніяк не більше. Тому,

- для ПЛ 6-10 кВ (типовий проліт 60 м) не рідше ніж через 2-3 опори;
- для ПЛ 35-750 кВ на кожній опорі.

При грозових перенапругах на ділянках траси ПЛ або конкретних опорах, установка обмежувачів перенапруг доцільна:

- на опорах, які часто вражаються блискавкою (рис.2.3, а та рис.2.3, б);
- на високих опорах з підвищеною індуктивністю (рис.2.3, б);
- на опорах з підвищеним опором заземлення (рис.2.3, в);
- в інших випадках.

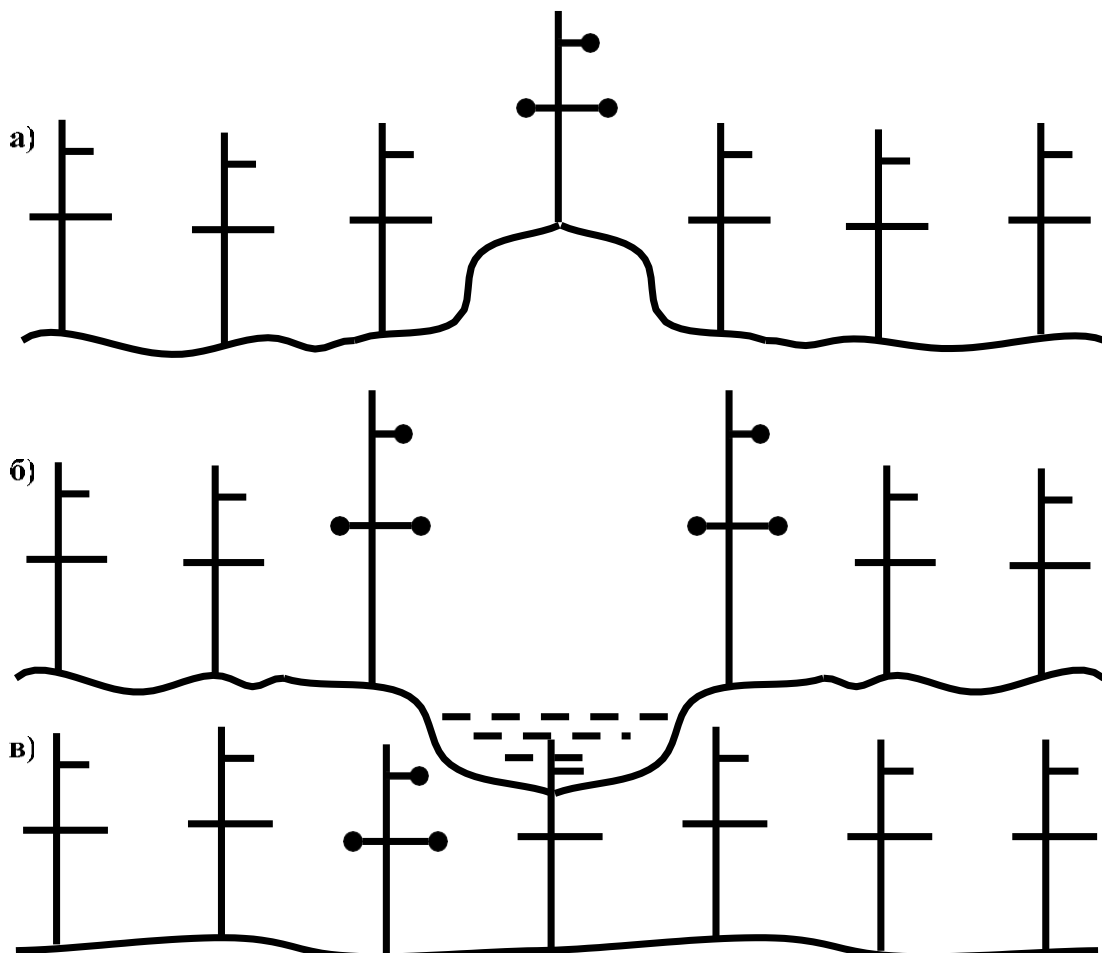


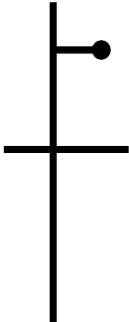
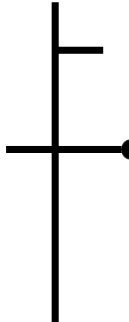
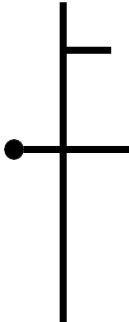
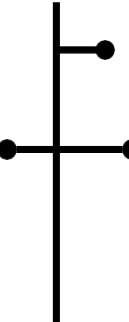
Рисунок 2.3. Розміщення обмежувачів перенапруг на проблемних опорах:  
 (а) - на опорах, які часто вражаються, (б) - на опорах з підвищеною індуктивністю, (в) - на опорах з підвищеним опором заземлення.

### 2.2.2 Місця установки обмежувачів перенапруг на одноланцюгових опорах

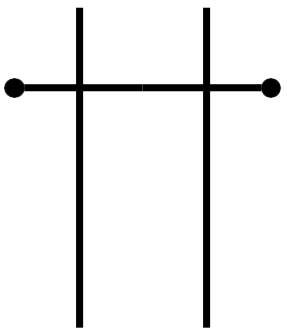
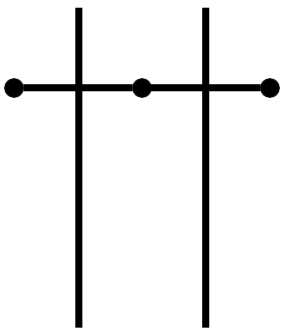
У таблиці 2.1-2.2 дані різні варіанти розміщення обмежувачів перенапруг на одноланцюговій опорі ПЛ, що відрізняються кількістю необхідних апаратів і ефективністю зниження кількості грозових перекриттів ізоляції лінії.

При розрядах блискавки грозові перенапруги на ізоляції різних фаз можуть бути різні, а першочергова установка обмежувачів перенапруг краща в ті фази, ізоляція яких піддається найбільшим впливів. Такі фази були виявлені раніше (в першому розділі) при спрощеному аналізі механізмів виникнення перенапруг і послужили основою для формулювання загальних рекомендацій по розміщенню обмежувачів перенапруг на одноланцюгових опорах, які наведені в табл.2.3 для трикутного розташування проводів і в табл.2.4 для горизонтального розташування проводів.

Таблиця 2.1. Захист одноланцюгових ПЛ з трикутним розташуванням проводів.

розташування ОПН на опорі	у верхній фазі	в нижній фазі (Під верхньою)	в нижніх фазах	у всіх фазах
схема				
число ОПН на опорі	1	1	2	3

Таблиця 2.2. Захист одноланцюгових ПЛ з горизонтальним розміщенням проводів.

розташування ОПН на опорі	в крайніх фазах	у всіх фазах
схема		
число ОПН на опорі	2	3

У кожному конкретному випадку оптимальний варіант захисту ПЛ повинен бути доведений техніко-економічними розрахунками, в яких, зокрема, необхідно визначити, а які з 4-х зазначених в табл.2.3-2.4 розрахункових випадків є основними причинами відключень ПЛ.

Для трикутного розташування проводів обґрунтуванням узагальнених рекомендацій табл.2.3 служать наступні положення:

- розряди блискавки в проводи найбільш вірогідні для верхніх фаз і, тому, саме в них виправдана установка обмежувачів перенапруг для захисту від перенапруг, викликаних прямими розрядами блискавки;
- при розрядах блискавки в опори лінії без тросу, незалежно від опору заземлення опор, найбільші перенапруги виникають на верхніх фазах, і саме вони вимагають захисту;
- при розрядах блискавки в троси вказати фази, які перекриваються частіше за інших, без проведення розрахунків досить складно, однак відомо, що при малих опорах заземлення частіше перекриваються верхні фази, а при підвищених опорах заземлення - нижні фази;
- індуктованим перенапругам піддається ізоляція всіх трьох фаз одноланцюгової опори, і, при захисті від них установка обмежувачів

перенапруг має бути на трьох фазах.

Для горизонтального розташування проводів обґрунтуванням узагальнених рекомендацій таблиці 2.4 служать наступні положення:

- при наявності тросів розряди блискавки вірогідні в крайні фази, а при відсутності троса в будь-яку фазу;
- всі три фазних проводи мають однакову висоту підвісу і рівну індуктивність ділянки опори від траверси до землі - тому при розрядах блискавки в опору лінії без троса не представляється можливим вказати фазу, ізоляція якої перекривається частіше за інших;
- при наявності тросів найбільший коефіцієнт зв'язку з тросами має місце для середньої фази (у неї «два троса», а у крайніх тільки «один трос») - тому при розрядах блискавки в трос найбільш часто будуть перекриватися крайні фази.

Таблиця 2.3. Грозові перенапруги на ізоляції одноланцюгової ПЛ з трикутним розташуванням проводів і рекомендації місць першочергової установки обмежувачів перенапруг.

№ розрахункового випадку	Місце розряду блискавки	Місце установки обмежувачів перенапруг	
		верхні фази	нижні фази
1	в фазний провід	+	
2	в опору лінії без троса	+	
3	в трос	+(Малі $R_3$ )	+(Великі $R_3$ )
4	поруч з ПЛ	+	+



Таблиця 2.4. Грозові перенапруги на ізоляції одноланцюгової ПЛ з горизонтальним розміщенням проводів і рекомендації місць першочергової установки обмежувачів перенапруг.

№ розрахунку цього випадку	Місце розряду блискавки	Місце установки обмежувачів перенапруг	
		крайні фази	Середні фази
1	в фазний провід лінії без троса	+	+
	в фазний провід лінії з тросом	+	
2	в опору лінії без троса	+	+
3	в трос (поблизу або на видаленні від опори)	+	
4	поруч з ПЛ	+	+

### 2.2.3 Встановлення обмежувачів перенапруг на багатоланцюгових опорах

При розрядах блискавки в опори і троси багатоланцюгової ПЛ можливе перекриття ізоляції одночасно декількох ланцюгів, що небажано для споживача, особливо якщо ПЛ є єдиним джерелом живлення. Ефективний захист від перенапруг подібних багатоланцюговим (дволанцюговим) ПЛ може бути побудований з використанням принципу поділу («диференціювання») ланцюгів на умовно «сильний» і умовно «слабкий».

Посилення ізоляції одного з ланцюгів досягається установкою в його фази обмежувачів перенапруг обмежувачів перенапруг - варіанти їх розміщення показані в табл.2.5. Загальні рекомендації по використанню того або іншого варіанта встановлення обмежувачів перенапруг аналогічні одноланцюговим ПЛ (табл.2.3).

Таблиця 2.5. Захист дволанцюгових ПЛ з горизонтальним розміщенням проводів

(Захист тільки одного ланцюга).

розташування ОПН на опорі	у верхній фазі	в нижній фазі	у верхній і середній фазах	в середній і нижній фазах	у всіх фазах
схема					
кількість ОПН на опорі	1	1	2	2	3

Таблиця 2.6. Захист дволанцюгових ПЛ з горизонтальним розміщенням проводів

(Захист обох ланцюгів).

розташування обмежувачів перенапруг на опорі	в верхніх фазах	в нижніх фазах	у верхніх і середніх фазах	в середніх і нижніх фазах	у всіх фазах
схема					
кількість обмежувачів перенапруг на опорі	2	2	4	4	6

У тих випадках, коли небажані не тільки багатоланцюгові, але навіть одноланцюгові відключення, для забезпечення захисту ізоляції від грозових перенапруг потрібно установка обмежувачів перенапруг в фазі всіх ланцюгів, які захищаються як це показано в табл. 2.6. Загальні рекомендації по використанню того або іншого варіанта розстановки обмежувачів перенапруг аналогічні одноланцюгових ПЛ (табл.2.3).

Основними традиційними засобами підвищення грозостійкості ПЛ є посилення ізоляції, поліпшення заземлення опор, установка на опорах блискавкозахисних тросів.

Для повітряних ліній 6-10 кВ в силу недостатньої міцності ізоляції традиційні засоби підвищення грозостійкості (трос, заземлення) виявляються малоефективними і не застосовуються, а установка обмежувачів перенапруг на опорах в ряді випадків виявляється єдиним рішенням.

Для повітряних ліній 35-750 кВ, якщо заземлення і тросові захист виконані належним чином, в більшості випадків немає необхідності в масовій установці обмежувачів перенапруг уздовж всієї траси ПЛ, а виправданою виявляється лише захист кількох «слабких» опор (перетину з ПЛ вищого класу напруги, переходи через річки, ін. місця). Відчутна потреба в обмежувачів перенапруг на ПЛ 35-750 кВ з'являється тоді, коли в силу різних причин традиційні засоби не реалізовані повною мірою:

- на частини траси або на всій її довжині відсутній тросовий захист;
- не забезпечені досить малі опори заземлення опор.

Спочатку обмежувачі перенапруг обмежувачів перенапруг були призначені для захисту від перенапруг обладнання розподільчих пристроїв (РП), де змінили попереднє покоління захисних апаратів - вентильних розрядників. Особливість розподільного пристрою полягає в тому, що на його території малоймовірний розряд блискавки в струмоведучу частину електроустановки - це досягається розміщенням на території РП потужної системи блискавковододів. Грозові перенапруги, що впливають на ізоляцію устаткування, викликаються грозовими хвилями, які надходили з приєднаних

до РП повітряних ліній, де вони утворюються внаслідок розрядів блискавки в ПЛ або поруч з нею. Таким чином, встановлені в розподільчому пристрої обмежувачів перенапруг розсіюють енергію грозових хвиль, вже ослаблених перекриттями ізоляції ПЛ, імпульсної короною і втратами.

Повітряні лінії мають власну систему захисту від прямих розрядів блискавки в струмопровідні частини (фазні проводи) - традиційний блискавкозахисний трос:

- ефективність троса така, що в ряді випадків ймовірність розряду блискавки в фазний провід по трасі ПЛ виявляється більше, ніж на території розподільчого пристрою, захищеного блискавковідводами;
- довжина ПЛ істотно більше габаритів РП;
- кількість обмежувачів перенапруг на ПЛ може бути істотно більше, ніж в РП.

Якщо на ПЛ для захисту ізоляції від грозових перенапруг встановлено велику кількість обмежувачів перенапруг, то необхідно зважати на імовірність прямого розряду блискавки в фазні проводи поблизу обмежувачів перенапруг. При відсутності на ПЛ блискавкозахисного троса така імовірність стає більшою. обмежувачів перенапруг може бути не розрахований на такий потужний вплив, яким є прямий розряд блискавки. Оцінимо ступінь небезпеки прямого розряду блискавки.

При роботі обмежувачів перенапруг в варисторах у вигляді тепла виділяється енергія, яка пропорційна кількості послідовно включених варисторів, і класу напруги обмежувачів перенапруг. Здатність обмежувачів перенапруг розсіювати енергію або пропускати імпульси струму перевіряється при так званих робочих випробуваннях, коли в ньому одночасно з впливом напруги 50 Гц пропускають  $N = 2$  Імпульсних струму прямокутної форми тривалістю  $T_{II} = 2000$  мкс, величина яких залежить від діаметра варисторів і лежить в діапазоні  $I_{II} = 300 \div 2000$  А

Для обмежувачів перенапруг з варисторами середнього діаметра справедливо тоді допустимий заряд складе

$$q = N \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt = N \cdot I_{II} \cdot T_{II} = 2 \cdot 1000 \cdot (2000 \cdot 10^{-6}) = 4 \text{ Кл.}$$

При розрядах блискавки в опори і троти основна частина струму блискавки стікає по тілу опори заземлюючих пристроїв, не викликаючи помітних струмів в встановлених на лінії обмежувачів перенапруг (за винятком підвищених R<sub>3</sub>).

При розрядах блискавки в фазні проводи в обмежувачів перенапруг протікають струми, зіставні з струмом блискавки - саме цей випадок є одним з найнебезпечніших з точки зору ризику перегріву і пошкодження обмежувачів перенапруг.

### 2.3 Обмежувачі перенапруг і внутрішні перенапруги на ПЛ

Серед усіх відключень ПЛ через перенапруги домінуючою причиною є лише грозові. У разі розміщення обмежувачів перенапруг на опорах повітряної лінії для захисту її ізоляції від грозових перенапруг небезпека перенапруг буде знижена. Разом з тим, встановлені обмежувачів перенапруг будуть піддаватися не тільки грозовим, а й іншим видам перенапруг: комутаційним і квазістаціонарним.

#### Комутаційні перенапруги

Вважається, що комутаційні перенапруги призводять до виділення в обмежувачів перенапруг енергій навіть більших, ніж при грозових перенапругах. При аналізі методик випробувань варисторів, що проводяться для тих, що розробляються конструкцій і типів обмежувачів перенапруг: здатність варисторів розсіювати енергію перенапруг перевіряється на імпульсах струму прямокутної форми тривалістю  $T_{II} = 2000$  мкс при величині струмів  $I_{II}$  в кілька сотень ампер. З точки зору величини струму подібні дії дійсно схожі на струми в обмежувачів перенапруг при обмеженні комутаційних перенапруг, хоча така велика тривалість струму в обмежувачів перенапруг можлива лише при комутаціях повітряних ліній довжиною

більше 500 км.

### Квазістаціонарні перенапруги

На загальну думку сучасні обмежувачів перенапруг не призначені для обмеження квазістаціонарних перенапруг, навіть при великому числі паралельно працюючих обмежувачів перенапруг.

Підвищення надійності роботи обмежувачів перенапруг можливо або за рахунок зниження рівня квазістаціонарних перенапруг, або за рахунок зміни властивостей самого обмежувачів перенапруг (рис.2.4):

- збільшення висоти колонки варисторів, тобто підвищення по напрузі вольтамперної характеристики, інакше зване «загрубленіє» обмежувачів перенапруг;

- збільшення діаметра колонки варисторів, що при заданій висоті колонки означає збільшення маси обмежувачів перенапруг, а значить його здатності поглинати енергію перенапруг без небезпечного перегріву.

Висота обмежувачів перенапруг визначається вимогами до мінімально допустимих відстаней від струмоведучих частин до заземлених. Захисні властивості варисторів такі, що будівельна висота обмежувачів перенапруг виявляється більше, ніж висота колонки варисторів. Для компенсації різниці висот обмежувачів перенапруг і колонки варисторів в конструкції обмежувачів перенапруг найчастіше є алюмінієві шайби (рис.2.4). У разі необхідності для збільшення висоти колонки варисторів досить замінити частину шайб на варистори, що не змінить габаритів обмежувачів перенапруг і майже не вплине на його вартість.

У разі необхідності збільшення діаметра варисторів доведеться змінювати радіальні розміри всіх елементів обмежувачів перенапруг (варисторів, ізоляції, фланців), що відчутно підвищить вартість обмежувачів перенапруг.

Розглянемо два обмежувачів перенапруг з різними вольтамперних характеристик, вільно показаними на рис.2.5. Нехай при заданому струмі падіння

напруги на другому обмежувачів перенапруг буде на 10% вище, ніж на першому:  $U_2 = 1.1 * U_1$ . тоді при впливі на обмежувачів перенапруг з боку мережі квазістаціонарних перенапруг рівня  $U'$  або  $U''$  співвідношення струмів в обмежувачів перенапруг складе  $I_2 = (0.5 \div 0.7) I_1$ .

Через різко нелінійну характеристику обмежувачів перенапруг невелике підвищення вольтамперної характеристики обмежувачів перенапруг по напрузі призводить до помітно більшого зниження струмів в обмежувачів перенапруг, а значить підвищенню його надійності. Для досягнення того ж ефекту, що досягався при незначному завищенні висоти колонки варисторів (їх вольтамперної характеристики), буде потрібно набагато більше помітне збільшення діаметра варисторів. Тому при заданому рівні квазістаціонарних перенапруг підвищення надійності роботи обмежувачів перенапруг доцільно тільки за рахунок деякого збільшення висоти колонки варисторів, а не за рахунок збільшення її діаметра.

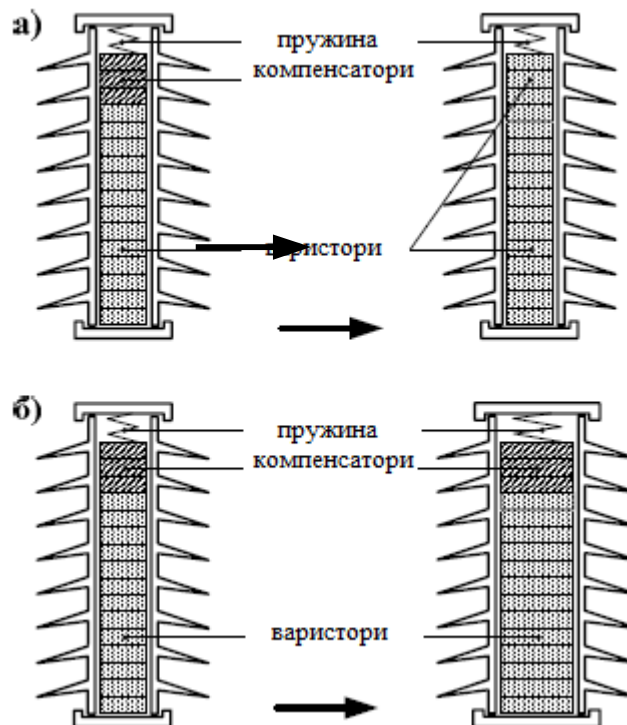


Рисунок 2.4. Різні способи підвищення надійності роботи обмежувачів перенапруг: за рахунок збільшення висоти колонки варисторів (а) або діаметра колонки (б)

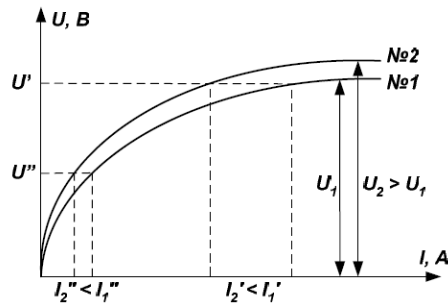


Рисунок 2.5 Підвищення надійності роботи обмежувачів перенапруг

#### 2.4. Основні типи обмежувачів перенапруг і спосіб їх приєднання до ПЛ

Існує два основних типи обмежувачів перенапруг, призначених для захисту ізоляції ПЛ від перенапруг (рис.2.6) - без зовнішнього іскрового проміжку і з ним.

Обмежувачі перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком (ОПН) не слід плутати з вентиляними розрядниками. Дійсно вентилянні розрядники і обмежувачі перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком мають послідовним іскровим проміжком, проте є такі відмінності:

- в конструкції обмежувачів перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком використовується зовнішній іскровий проміжок, а в конструкції РВ - внутрішній;
- в конструкції обмежувачів перенапруг і обмежувачі перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком використовуються нелінійні елементи набагато досконаліші, ніж в конструкції вентиляних розрядників.

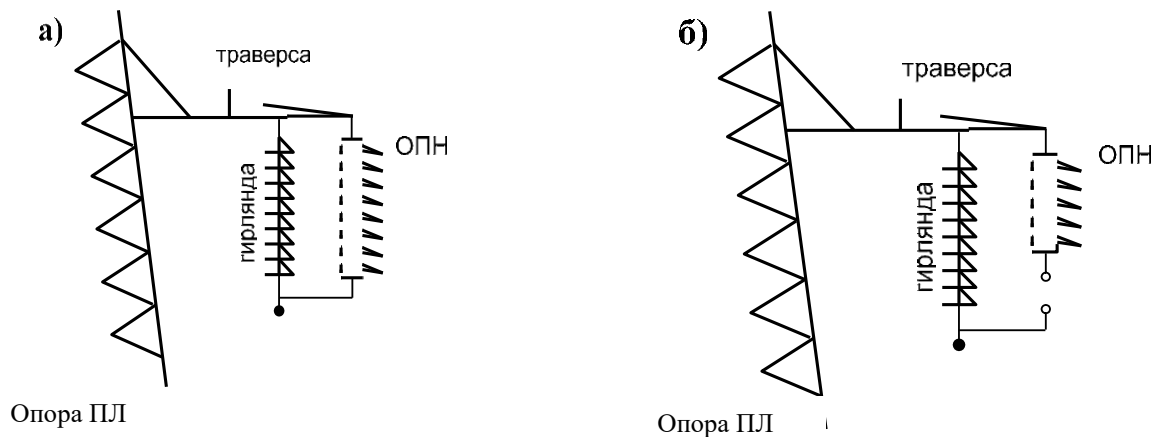




Рисунок 2.6. Принципові способи кріплення обмежувачі перенапруг до опори: (а) - без іскрового проміжку, (б) - через зовнішній іскровий проміжок.

У конструкції обмежувачів перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком іскровий проміжок (ІІ) налаштовується на спрацювання при грозових перенапруженнях, виключаючи вплив на нелінійні елементи нормального робочого напруги мережі, а також квазістаціонарних і комутаційних перенапруг. Перераховані особливості обмежувачів перенапруг із зовнішнім іскровим проміжком, як це прийнято вважати, є його перевагами, проте, насправді:

- комутаційні перенапруги слід враховувати лише для довгої повітряної лінії 330-750 кВ і тільки тоді, коли на ній встановлений єдиний комплект обмежувачів перенапруг;

- квазістаціонарних перенапруги майже не становлять небезпеки для обмежувачів перенапруг при правильному виборі [30] його найбільшої робочої напруги  $U_{нро}$

- для підвищення надійності обмежувачів перенапруг на ПЛ допустимо застосовувати обмежувачів перенапруг з підвищеним  $U_{нро}$ , оскільки ізоляція ПЛ має більшу імпульсну міцність в порівнянні з внутрішньою ізоляцією РП;

- тривалий вплив на обмежувачів перенапруг робочої напруги мережі згідно з дослідженнями [31] призводить до відновлення первісної вольтамперної характеристики обмежувачів перенапруг, компенсуючи деградацію властивостей нелінійних елементів, викликану проходженням імпульсних струмів;

- тривалий вплив напруги «підсушує» апарат, збільшуючи ризик його зволоження.

Лише для довгих ПЛ 330-750 кВ при одиничній установці обмежувачів перенапруг наявність іскрового проміжку є певною перевагою обмежувачів перенапруг, тоді як в інших випадках іскровий проміжок - скоріше недолік.

Найважливішим фактором, який слід враховувати при виборі способу

приєднання обмежувачів перенапруг до опори, є можливість подальшої експлуатації ПЛ в разі пошкодження одного з встановлених обмежувачів перенапруг.

ОПНІ, як правило, має жорстке кріплення до опори, необхідне для забезпечення сталості габаритів іскрового проміжку. При виході з ладу обмежувачів перенапруг, встановленого через іскровий проміжок, на ПЛ з'являється місце з ослабленою електричною міцністю. Виявлення такого обмежувача перенапруг складне, оскільки пошкодження обмежувачів перенапруг може ніяк не позначитися на зовнішньому вигляді, і не завжди апарат можливо побачити при обході ПЛ.

Відсутність іскрового проміжку робить можливим приєднання обмежувачів перенапруг до опори за допомогою гнучкого шлейфа, в який встановлюється - «відділювач» (рис.2.7, а). Відділювач:

- при нормальному режимі роботи не проявляє себе, коли через обмежувачів перенапруг проходять струми провідності ОПН;
- в режимі обмеження грозових і комутаційних перенапруг не проявляє себе, при проходженні через ОПН імпульсних струмів;
- руйнується (рис.2.7, б) при виході ОПН з ладу внаслідок протікання в ньому підвищених струмів промислової частоти.

У мережі з заземленою нейтраллю (це 110-750 кВ) в разі пошкодження обмежувача перенапруг в ньому пройде струм однофазного короткого замикання мережі, який призведе до швидкого руйнування «відділювача» і від'єднання обмежувача перенапруг від лінії ще до вимкнення ПЛ головними вимикачами. Хоча лінія буде короткочасно відключена, її автоматичне повторне включення буде успішним. При цьому наявність розірваного шлейфа не заважає подальшій експлуатації ПЛ і під час огляду ПЛ однозначно вказує на пошкоджений апарат (рис.2.7, б).

У мережі з ізолюваною або компенсованою нейтраллю (це 6-35 кВ) в разі пошкодження обмежувача перенапруг складніше, так як в обмежувача

перенапруг протікають лише малі (ємнісні) струми однофазного замикання на землю, які не здатні привести до надійного спрацьовування звичайного «Відділювача». Відсутність конструкції «відділювача» для мереж 6-35 кВ до недавнього часу було фактором, серйозно стримує застосування обмежувача перенапруг на ПЛ 6-35 кВ.

При однофазному замиканні в мережах 6-35 кВ внаслідок малих струмів релейний захист не може селективно виявити фідер з пошкодженням ізоляції, а працює лише на сигналізацію. Якщо замикання на землю пов'язано з пошкодженням одного з встановлених на лінії обмежувача перенапруг, то через кілька хвилин його УВ зруйнується, від'єднавши обмежувач перенапруг від лінії, відновивши нормальний режим роботи лінії і привівши до зникнення сигналізації.

При багатофазних пошкодженнях в мережі 6-35 кВ струми короткого замикання вже достатні для селективної роботи релейного захисту. Якщо воно пов'язано з пошкодженням встановленого на лінії обмежувача перенапруг, то в такому обмежувача перенапруг пройде струм короткого замикання, який призведе до швидкого руйнування відповідного УВ, розриву шлейфу і від'єднання обмежувача перенапруг від лінії ще до вимкнення ПЛ головними вимикачами. При цьому розрив шлейфа:

- не дає пошкодженому обмежувачу перенапруг заважати подальшій експлуатації ПЛ, забезпечуючи успішність АПВ;
- зменшує число місць мережі з пошкодженням ізоляції;
- під час огляду ПЛ однозначно вкаже на пошкоджений апарат (рис.2.7, б).

Наявність у обмежувача перенапруг іскрового проміжку, що не дозволяє використовувати будь-якої відділювач, може бути виправдано лише в деяких випадках при одиничній установці обмежувача перенапруг на довгих ПЛ 330-750 кВ. У всіх інших випадках приєднання ОПН до ПЛ має бути безіскровим:

- через УВ в мережах з ізольованою (компенсованій) нейтраллю;
- через УВ або звичайний «відділювач» в мережах з заземленою

нейтраллю.

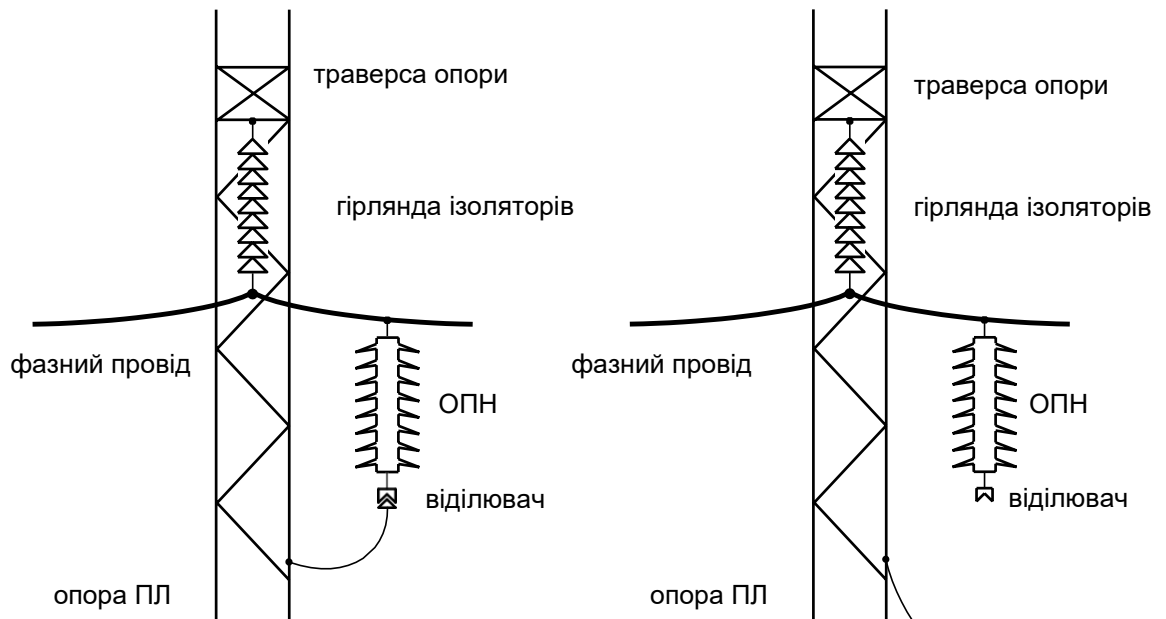


Рисунок 2.7. Варіант приєднання до опори обмежувача перенапруг без іскрового проміжку через відділювач: (а) - до пошкодження обмежувача перенапруг, (б) - після пошкодження

## 2.5. Вибір характеристик обмежувачів перенапруг і оцінка ризику його пошкодження

Якщо на кожній опорі ПЛ у всіх фазах встановлені обмежувача перенапруг, то грозові перекриття ізоляції ПЛ не можливі при будь-якому  $R_3$  і будь-якій кількості тросів (0,1,2 ...), проте два цих чинника серйозно впливають на струм і енергію в обмежувача перенапруг, визначаючи ризик пошкодження встановлених апаратів, який слід враховувати при виборі основних характеристик обмежувача перенапруг.

В [30] показано, що основними характеристиками обмежувача перенапруг, пов'язаними з властивостями його нелінійних елементів, є:

- найбільша робоча напруга  $U_{НРО}$ ;
- питома енергія, що поглинається  $W_{уд}$ .

Ще одним важливим параметром є «імпульс великого струму  $I_{4/10}$  (форма 4/10 мкс), оскільки він відображає здатність обмежувача перенапруг пропускати значні за величиною імпульсні струми.

Найбільша робоча напруга  $U_{HPO}$  визначає:

- надійність роботи обмежувача перенапруг в нормальному режимі і при квазістаціонарних перенапругах (чим більше  $U_{HPO}$  - тим краще);
- рівень залишається напруги обмежувача перенапруг при обмеженні грозових і комутаційних перенапруг (чим менше  $U_{HPO}$  - тим краще).

Оскільки, як було показано, в рамках заданого класу напруги обмежувача перенапруг значення напруги мало впливає на число грозових відключень ПЛ, то з двох перерахованих факторів основна увага приділяється першому, тобто підвищенню надійності роботи обмежувача перенапруг. Рекомендації по  $U_{HPO}$  зведені в табл.2.1.

*Імпульс струму  $I_{4/10}$  для ПЛ всіх класів напруги слід приймати максимально можливим - в даний час це 100 кА. Таке значення в вигляді жирної вертикальної лінії нанесено на наведених раніше рисунках, які відносяться до струмових впливів на обмежувачі перенапруг. Вибір  $I_{4/10} = 100$ кА має підвищити надійність роботи обмежувача перенапруг, при прямих розрядах блискавки в фазні проводи ПЛ.*

Таблиця 2.7. Рекомендовані значення  $U_{HPO}$  і  $I_{4/10}$ , для підвищення надійності ОПН.

$U_{НОМ}$ , кВ	6	10	35	110	220	330	500	750
$U_{HPO}$ , кВ	7.6	12.7	42.5	88	176	230	333	500
$I_{4/10}$ , кА	100	100	100	100	100	100	100	100

Здатність обмежувача перенапруг поглинати енергію  $W$  при грозових імпульсних токах спеціальними випробуваннями не перевіряється.  $W$  можна оцінити на основі випробувань обмежувача перенапруг більш високих класів пропускної здатності [29], в рамках яких на обмежувач перенапруг в сукупності з напругою промислової частоти впливають  $N = 2$  імпульсний струм прямокутної форми тривалістю  $T = 2000$  мкс і величині  $I_{II}$

$$W = N \cdot \int_t u(t) \cdot i(t) \cdot dt = N \cdot \left\{ \sqrt{2} \cdot U_{\text{НРО}} \right\} \cdot K \cdot I_{\text{П}} \cdot T ,$$

де  $K \approx 2$  - кратність обмеження перенапруг

Питоною енергією  $N$  імпульсів струму називається величина енергії, приведена до найбільшої робочої напруги обмежувача перенапруг:

$$W_{\text{уд}} = \frac{W}{U_{\text{НРО}}} = N \cdot \sqrt{2} \cdot K \cdot I_{\text{П}} \cdot T .$$

Для обмежувача перенапруг 110 кВ, що має найбільшу робочу напругу  $U_{\text{НРО}} = 88$  кВ і струм пропускної здатності  $I_{\text{П}} = 1000$  А, припустиму енергію можна оцінити як  $W \approx 1000$  кДж.

При розрядах блискавки в фазні проводи і опори (ПЛ без троса) енергія в найбільш навантаженому обмежувачі перенапруг 110 кВ може помітно перевищувати рівень 1000 кДж, тобто завжди існує ризик пошкодження встановлених обмежувачів перенапруг.

Ризик пошкодження обмежувача перенапруг залежить:

- від питомої енергії обмежувача перенапруг  $W_{\text{пит}}$  (або від енергії  $W$ );
- від наявності у обмежувача перенапруг зовнішнього іскрового проміжку;
- від опору заземлення опор;
- від наявності троса;
- від числа фаз, в які на опорі встановлені обмежувачі перенапруг;
- від числа опор з обмежувачами перенапруг.

У разі, коли обмежувачі перенапруг встановлені лише на кількох опорах уздовж траси ПЛ, отримати  $N_{\text{ОПН}}$  не можливо, оскільки вона пропорційна числу розрядів блискавки в лінію поблизу обмежувача перенапруг і його опори.

В таблиці 2.7, видно, що річне число ушкоджень обмежувача перенапруг істотно знижується з ростом допустимих енергетичних впливів на обмежувача перенапруг (з ростом його питомої енергії  $W_{\text{пит}}$  або пропорційній їй величині – струму пропускної здатності  $I_{\text{П}}$ ). Пошкодження обмежувача перенапруг

викликає коротке замикання на ПЛ і вимагає її відключення з подальшим запуском циклу АПВ, успішність якого залежить від факту наявності універсального відділювача.

Якщо ПЛ захищена за допомогою порівняно «легких» обмежувачів перенапруг з струмом пропускної здатності  $I_{II} = 500$  А, то частота пошкоджень обмежувачів перенапруг в розрахунку на 100 км довжини ПЛ і 100 грозових годин частота складе:

- для ПЛ без троса  $N_{ОПН} \approx 3$  в рік (три ОПН за рік);
- для ПЛ з тросом  $N_{ОПН} \approx 0.01 \div 0.02$  в рік (один ОПН за 50-100 років).

З огляду на викладене, на ПЛ без троса використання «легких» обмежувача перенапруг неприпустимо, а рекомендується використання порівняно «важких» обмежувача перенапруг з грозових годин мати «розумне» річне число пошкоджень  $N_{ОПН} \leq 0.5$  при реальних довжинах ліній і числі грозових годин мова йде про пошкодження одного ОПН за кілька років експлуатації ПЛ).

Таблиця 2.8, а. Оцінка по (2.4) річного числа пошкоджень обмежувача перенапруг при їх установці на усі три фази кожної опори одноланцюгової ПЛ 110 кВ без троса.

$R_3$ , Ом	$I_{II}$ , А	$D_\phi$	$P_\phi$	$D_o$	$P_o$	$N_{ОПН}$ , на 100 км і 100 год
10	500	0,5	0,0434	0,5	0,0048	2,41
	1000	0,5	0,0072	0,5	0,0002	0,37
	1500	0,5	0,0006	0,5	0,0000	0,03
30	500	0,5	0,0212	0,5	0,0252	2,32
	1000	0,5	0,0024	0,5	0,0040	0,32
	1500	0,5	0,0002	0,5	0,0000	0,01
100	500	0,5	0,0210	0,5	0,0438	3,24
	1000	0,5	0,0022	0,5	0,0070	0,46
	1500	0,5	0,0000	0,5	0,0012	0,06

Таблиця 2.9, б. Оцінка по (2.4) річного числа пошкоджень обмежувача перенапруг при їх установці в усі три фази кожної опори одноланцюгової ПЛ 110 кВ з тросом.

$R_z$ , Ом	$I_{II}$ , А	$D_\phi$	$P_\phi$	$(D_\phi \cdot P_\phi + D_0 \cdot P_0)$	$N_{опн}$ , на 100 км і 100 год
10	500	0,005	0,0434	0	0,0217
	1000	0,005	0,0072	0	0,0036
	1500	0,005	0,0006	0	0,0003
30	500	0,005	0,0212	0	0,0106
	1000	0,005	0,0024	0	0,0012
	1500	0,005	0,0002	0	0,0001
100	500	0,005	0,0210	0	0,0105
	1000	0,005	0,0022	0	0,0011
	1500	0,005	0,0000	0	0,0000

## 2.6 Ефективність традиційних способів підвищення грозостійкості при ударі блискавки в опору або трос

При ударі блискавки в заземлені частини конструкції ПЛ 110 кВ для різних опорів заземлення опор були побудовані криві виду рис.3.4, а після їх обробки отриманий рис.3.5, на якому дані залежності ймовірності перекриття ізоляції фаз «А», «В», «С» від опору заземлення опори:

- пунктирна лінія відповідає розряду блискавки в опору ПЛ без троса;
- суцільна лінія відповідає розряду блискавки в трос; при ударі в трос ймовірність розряду блискавки в трос вважається однаковою і для ділянки троса поблизу від опори, і для ділянки троса в середній частині прольоту між опорами.



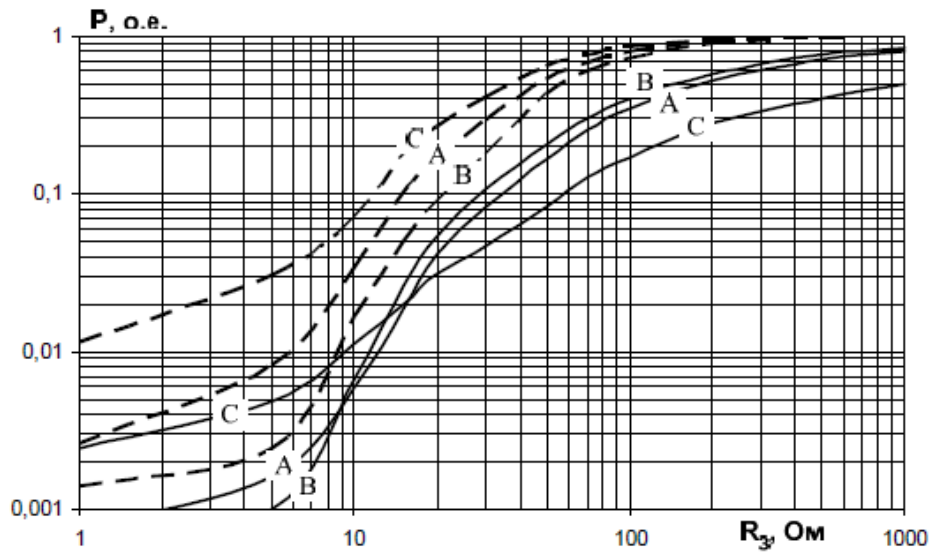


Рисунок 2.8. Імовірність перебиття ізоляції різних фаз одноланцюгової ПЛ 110 кВ в залежності від опорного опору заземлення опор: пунктирна лінія - при розрядах блискавки в опору лінії без тросу; суцільна лінія - при розрядах блискавки в трос лінії з тросом.

З рис.2.8 видно: при дуже малих опорних опорах заземлення вірогідні перебиття ізоляції ПЛ 110 кВ. При розряді блискавки в трос або опору по опорі в землю стікає імпульсний струм, що створює падіння напруги на заземлювальному пристрої опору  $R_3 \cdot i_{оп}(t)$ , і на індуктивності ділянки опору від землі до траверси  $L_{ТРАВ} \cdot \delta i_{оп}(t) dt$ .

Висока напруга на опорі щодо фазного проводу призводить до перебиття ізоляції з заземленою траверсою на фазний провід, тобто до «зворотнього» перебиття. Внаслідок наявності падіння напруги на індуктивності опору навіть ідеальне заземлення опору  $R_3 \approx 0$  не гарантує відсутності зворотних перебиттів ізоляції ПЛ 110 кВ при ударах блискавки в її трос або опору. Оскільки для верхніх фаз ПЛ 110 кВ індуктивність  $L_{ТРАВ}$  ділянки опору до заземлювального пристрою виявляється більше, то на рис.2.8 (пунктир) для верхньої фази «С» зафіксована підвищена ймовірність перебиття ізоляції в порівнянні з нижніми фазами «А» і «В».

Для лінії з тросом по рис.2.8 (суцільна лінія) верхня фаза «С» є

визначальною в числі зворотних перекриттів лише при «малих» опорах заземлення, коли слабо вплив встановленого троса на шляху розтікання струму блискавки. При «великих» опорах заземлення струм блискавки стікає в землю не тільки через заземлюючі пристрої найближчої опори, а й по тросу заземлюючих пристроїв сусідніх опор (рис.2.9, а). Наявність напруги на тросі і опорі  $u_{оп}(t)$  призводить до наведенням на фазні проводи  $u_{ф}(t)=K_{фТ}u_{оп}(t)$ , де  $K_{фТ}$ - коефіцієнт зв'язку провода і троса [2]. Наведення (або коефіцієнт  $K_{фТ}$ ) виявляються максимальними для верхнього фазного проводу «С», найбільш близько розташованого до троса, тобто для верхньої фази буде найменша напруга на ізоляції  $(1-K_{фТ})u_{оп}(t)$  і ймовірність її перекриття рис.3.5 (суцільна лінія) при «великих» опорах.

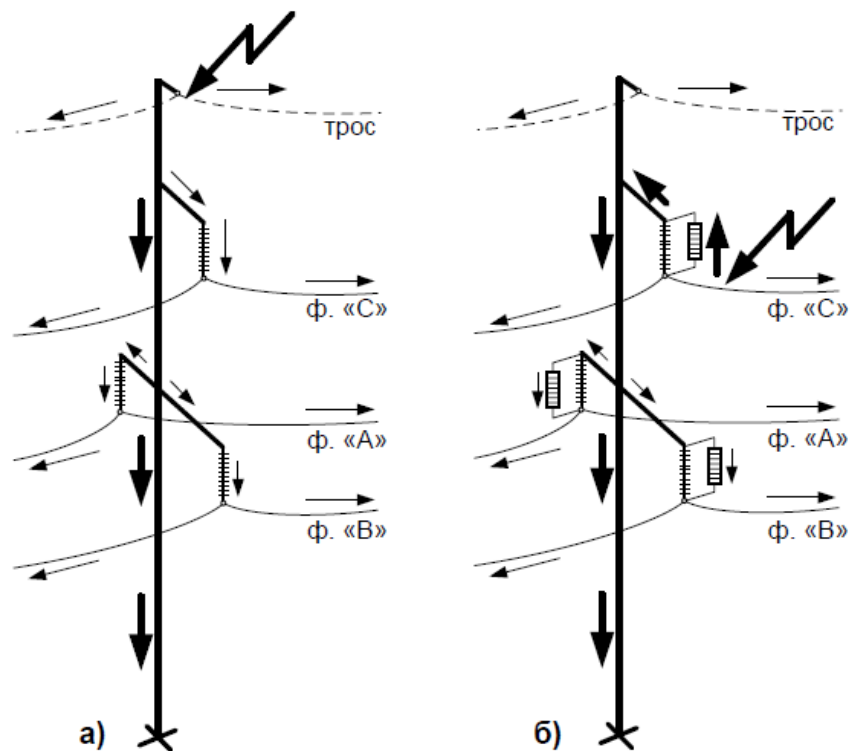


Рисунок 2.9. Шляхі розтікання струму блискавки, при розрядах:  
 (а) - в трос або опору лінії без обмежувача перенапруг, (б) - в фазний провід лінії з обмежувачем перенапруг.

У мережі 110 кВ з заземленою нейтраллю для виникнення короткого замикання і появи необхідності вимкнення ПЛ достатньо перекриття ізоляції

хоча б однієї з трьох фаз. Тому далі будемо розглядати лише максимальну серед усіх фаз ймовірність перекриття ізоляції ПЛ - для рис.2.8 така ймовірність показана на рис.2.10 (суцільна крива №2 і пунктирна крива №2). Криві №1 і №3 отримані в разі, коли довжина гірлянди ізоляторів ПЛ 110 кВ відрізняється від наведеної в розрахунках  $L_з= 1.25$ м.

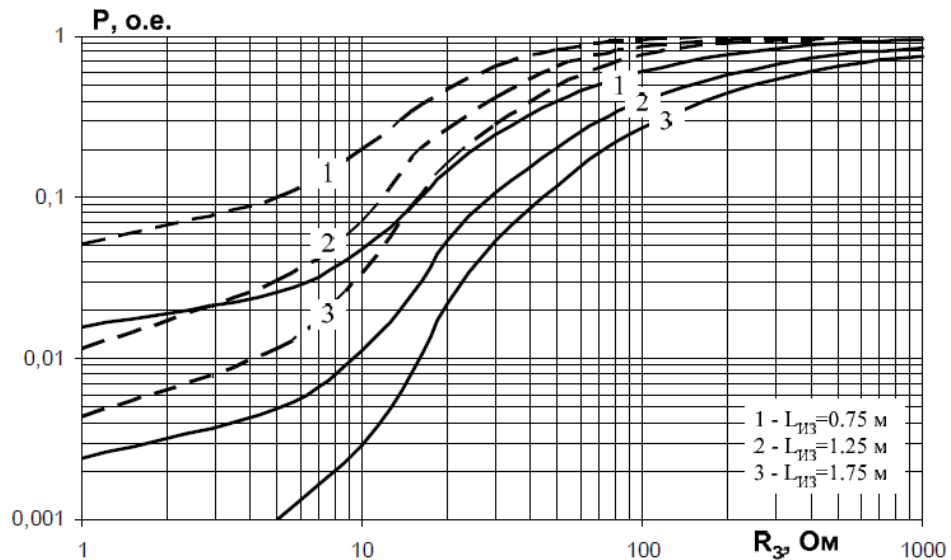


Рисунок 2.10. Ймовірність перекриття ізоляції одноланцюгової ПЛ 110 кВ в залежності від опору заземлення опор і довжини гірлянди ізоляторів: пунктирна лінія - при розрядах блискавки в опорі лінії без троса; суцільна лінія - при розрядах блискавки в трос лінії з тросом.

Криві, на рис.2.10, ілюструють відомий факт того, що для зниження ймовірності перекриття ізоляції ПЛ потрібно:

- зниження опору  $R_з$  заземлення опор;
  - підвищення міцності ізоляції ПЛ (підвищення
  - установка тросової захисту.

Для більш широкого діапазону довжин  $L_з= 0.25 \div 2.25$  м, що охоплює класи напруги від 10 кВ до 220 кВ, ефективність традиційних засобів підвищення грозостійкості ПЛ можна оцінити за рис.2.11. Відповідно до рис.2.11 :

- кожне додаткове зменшення опору заземлення опор впливає на число перекриттів ізоляції ПЛ все більш відчутно;
- при посиленій ізоляції установка троса знижує число перекриттів ізоляції

ПЛ в більше число разів, ніж це відбувається для недостатньо міцною ізоляції;

- установка троса значно ефективніший при малих опорах заземлення  $R_3$  опор, ніж при підвищених.

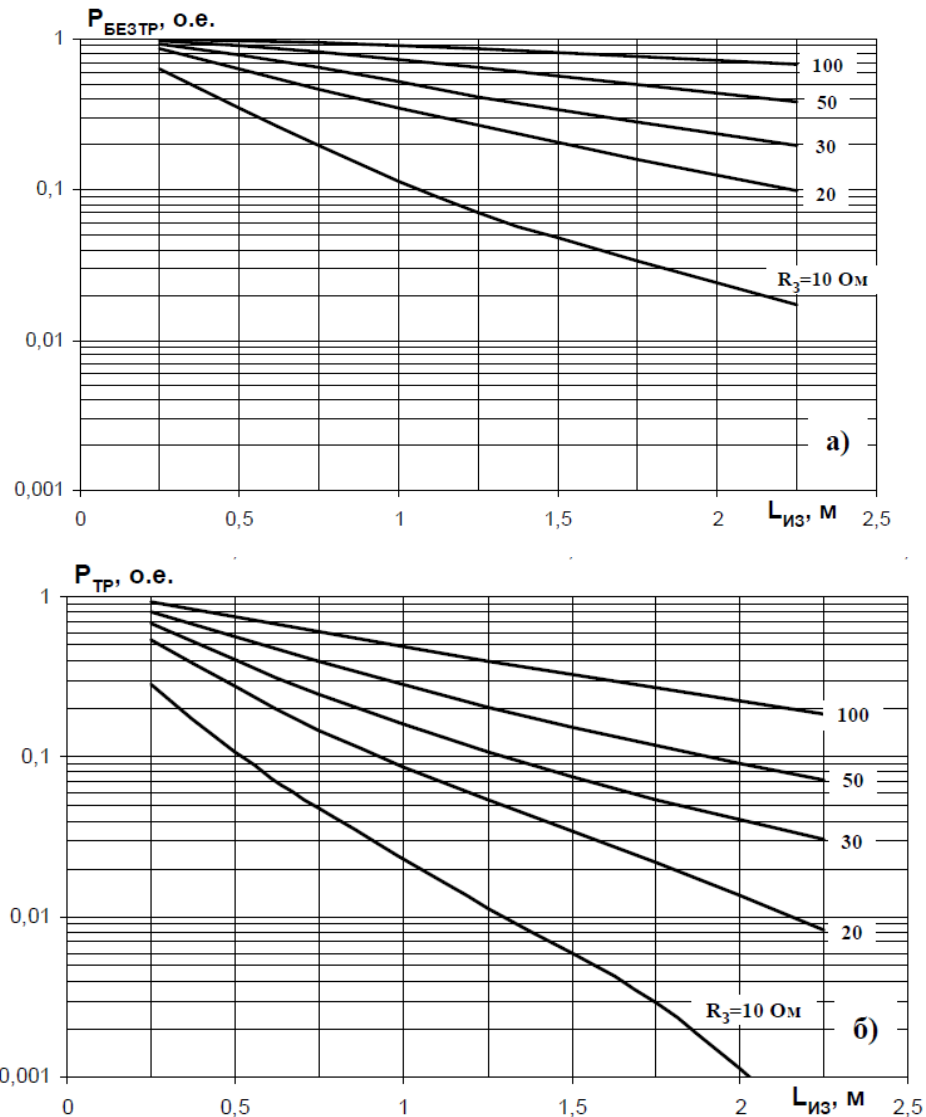


Рисунок 2.11. Імовірність перекриття ізоляції одноланцюгової ПЛ 110 кВ в залежності від опору заземлення опор і довжини гірлянди ізоляторів: (а) - при розрядах блискавки в опору лінії без троса, (б) - при розрядах блискавки в трос лінії з тросом.

Вплив троса додатково відображено на рис.2.12, отриманому на основі рис.2.11. Видно зниження ймовірності перекриття ізоляції ПЛ, якщо трос встановлювати на лініях з високою міцністю ізоляції і малими опорами

заземлення опор. Дані рис.2.12 ілюструють неефективність троса при прямих розрядах блискавки в ПЛ 6-10 кВ з низькою імпульсною міцністю ізоляції.

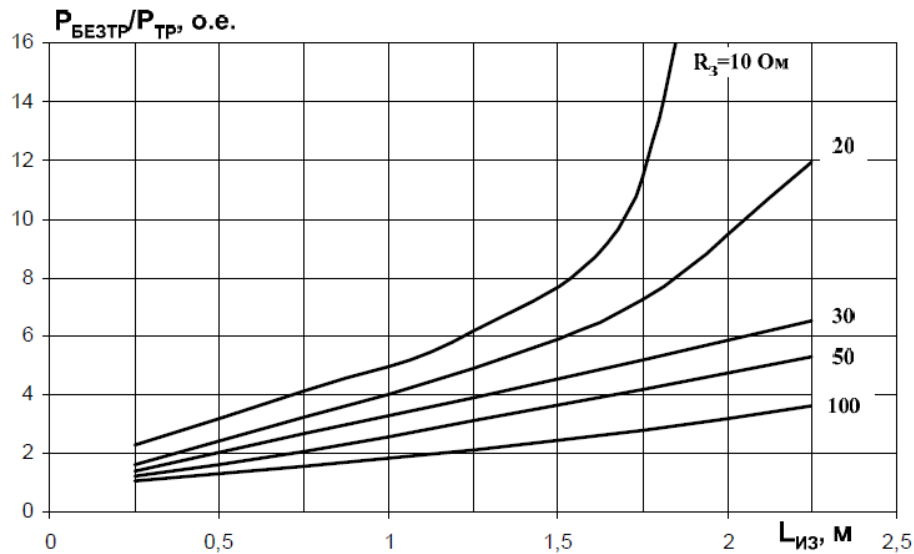


Рисунок 2.12. Ефективність установки троса при розрядах блискавки в заземлені частини ПЛ в залежності від опору заземлення опор і довжини гірлянди ізоляторів.

## 2.7. Частота установки обмежувачів перенапруг уздовж траси

ПЛ при ударі блискавки в фазний провід

Перекриття ізоляції ПЛ 110 кВ можливо на опорах вздовж гірлянд ізоляторів. На опорі з обмежувачем перенапруг при правильному виборі його характеристик перекриття ізоляції захищених фаз виключено, але зясуємо здатність ОПН в знижувати грозові перенапруги на ізоляції інших опор.

Тут і далі будемо вважати, що обмежувач перенапруг не має іскрового проміжку, оскільки такі апарати потрібно використовувати при масовій установці обмежувачів перенапруг уздовж траси ПЛ. Характеристики обмежувачів перенапруг, приймемо з найбільшою робочою напругою  $U_{НРО} = 88кВ$  напругою 250 кВ при імпульсному струмі 10 кА.

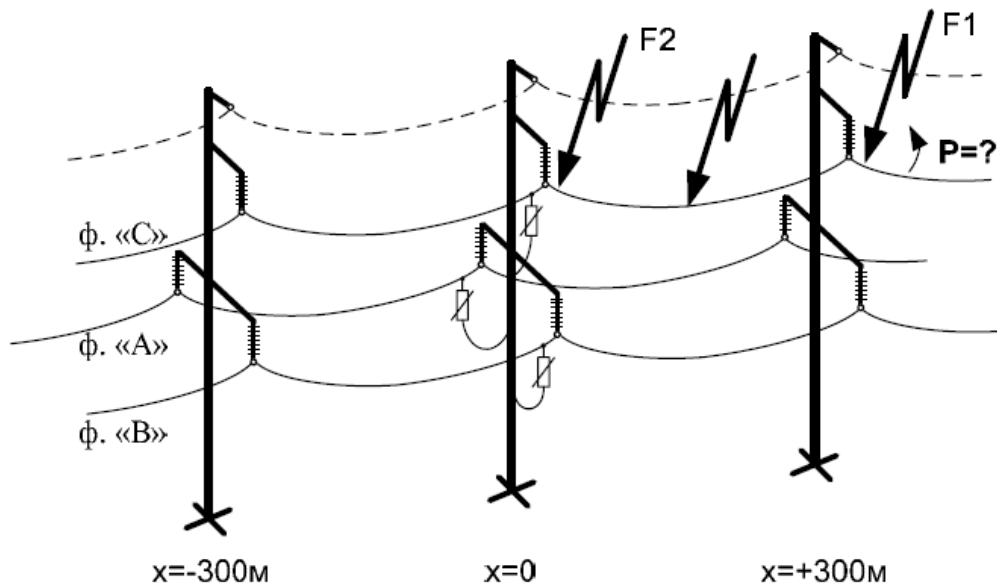


Рисунок 2.13. Одноланцюгова ПЛ з прольотом 300 м і комплектом обмежувачів перенапруг на одній з опор.

На рис.2.13 показаний фрагмент одноланцюгової ПЛ 110 кВ, на якій обмежувачі перенапруг встановлені не на кожній опорі, а через опору. Припустимо, що на ПЛ немає троса, а розряд блискавки відбувається в верхній фазний провід (точки №1,2,3). Імовірність перекриття ізоляції незахищеної опори в залежності від координати  $x$  місця розряду блискавки дана на рис.2.14.

Згідно рис.2.14 розряд блискавки в фазний провід на відстані  $x = 300$  метрів від опори з обмежувачем перенапруг (точка F1) не залежно від величини опору заземлення  $R_3$  супроводжується перекриттям ізоляції ПЛ з імовірністю  $P$ . При розряді блискавки в точку F2 ( $x = 0$ , є обмежувач перенапруг) ймовірність  $P$  перекриття ізоляції незахищені опори зберігається. Це пояснюється тим, що по фазному проводу в сторону незахищені опори поширюється хвиля  $u_{\text{ОПН}} + L_{\text{ТРАВ}} \cdot di(t)/dt + R_3 \cdot i(t)$ , максимальне значення якої в залежності від величини  $i_M(t)$  струму блискавки і швидкості його зміни  $di_M(t)/dt$  може помітно перевищувати і залишається напруга опори ПЛ  $u_{\text{ОПН}}$  на обмежувачі перенапруг, і міцність гірлянди ізоляторів незахищена.

Ефективність масової установки ОПН на кожній другій опорі ПЛ можна

визначити по площі під кривими виду рис.2.14. Така площа являє собою середню ймовірність перекриття ізоляції при розряді блискавки в будь-яку точку фазного проводу, а результати її розрахунку представлені на рис.2.15 в залежності від опору заземлення опор і довжини прольоту. Крива №4 на рис.2.15 відповідає випадку відсутності обмежувача перенапруг на лінії.

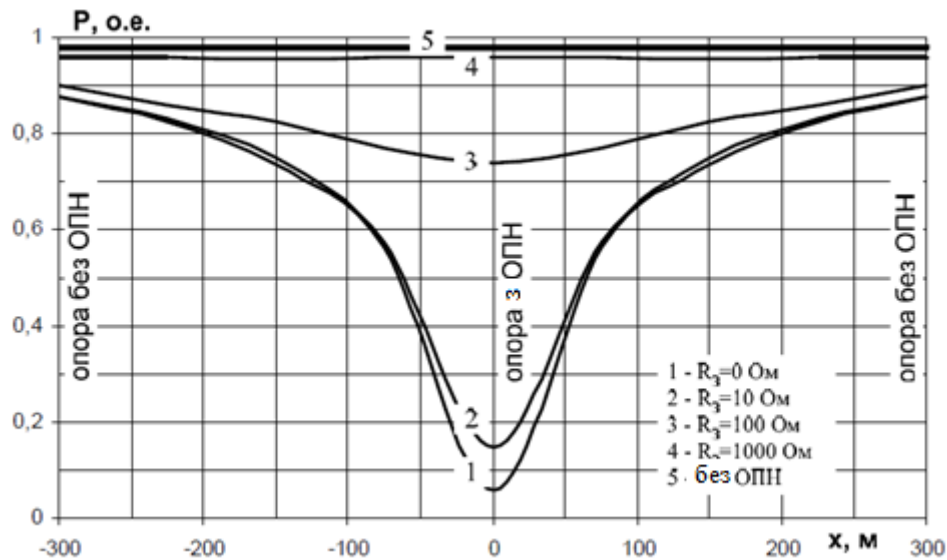


Рисунок 2.14. Імовірність перекриття ізоляції фази «С» на незахищеній обмежувачем перенапруг опорі в залежності від координати  $x$  розряду блискавки в фазний провід «С» і опору заземлення  $R_3$  опор (трос не встановлено)

Аналіз залежностей рис.2.15, отриманих в окремому випадку розряду блискавки в фазний провід ПЛ 110 кВ без тросу, дозволяє зробити висновки, що співпадають з урахуванням світового досвіду:

- установка обмежувача перенапруг через опору є ефективною лише для ліній з малою довжиною прольоту; при типових довжинах прольоту ПЛ 110 кВ, що становлять 200-300 метрів, потрібна установка ОПН на кожній опорі;
- для захисту ізоляції лінії не потрібне використання обмежувачів перенапруг, мають знижені залишаються напруги; в рамках заданого класу напруги повітряної лінії і класу обмежувача перенапруг значення напруги ОПН не суттєво впливає на процеси при розрядах блискавки в ПЛ.

Оскільки швидкість хвилі кінцева і для ліній без троса, і для ліній з тросом, і при розрядах в фазний провід, і при розрядах в опору або трос, то висновки, проілюстровані на прикладі окремого випадку розряду блискавки в фазний провід ПЛ без троса, є загальними:

- при захисті всієї траси ПЛ установка обмежувача перенапруг потрібно не рідше, ніж кожні 200-300 метрів, тобто на кожній опорі ПЛ 35-750 кВ або через кожні 2-3 опори для ПЛ 6-10 кВ;
- при установці обмежувача перенапруг на окремих опорах зона захисту обмежувача перенапруг обмежується ізоляцією цих опор.

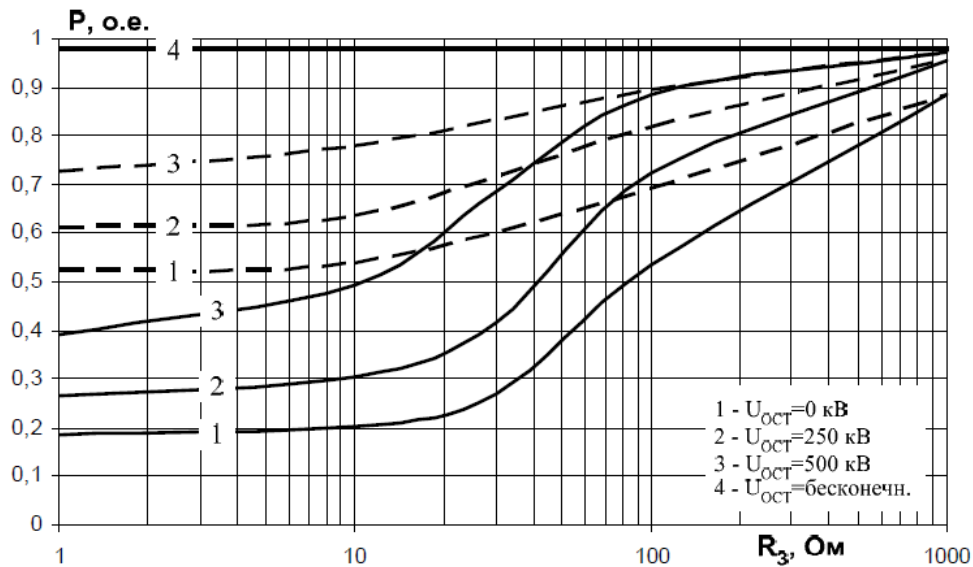


Рисунок 2.15. Імовірність перебиття ізоляції ПЛ без троса при розрядах блискавки в фазний провід в залежності від опору заземлення  $R_z$  опор і захисних характеристик обмежувача перенапруг, які встановлені на кожній другій опорі.

Довжина прольоту 300 м (пунктирна лінія) або 100 м (суцільна лінія). Крива №4 відповідає відсутності обмежувача перенапруг.

## 2.8 Обґрунтування місць установки обмежувачів перенапруг на опорі ПЛ

Для ПЛ 110 кВ без троса небезпеку становлять і розряди блискавки в верхній фазний провід «С» і розряди в опору, які супроводжуються



перекриттями, перш за все, фаз «С» і «А». Тому для ПЛ без троса поетапне підвищення грозостійкості за рахунок установки обмежувача перенапруг на кожній опорі може бути організовано наступним чином:

- обмежувача перенапруг не встановлені (крива №1 на рис.2.16);
- встановлення обмежувача перенапруг в фазу «С» (крива №2);
- встановлення обмежувача перенапруг в фази «С» і «А» (крива №3);
- встановлення обмежувача перенапруг в фази «С», «А», «В» ( $P = 0$  на рис.2.16).

Для ПЛ 110 кВ з тросом при типових опорах заземлення основну небезпеку представляють зворотні перекриття при розрядах блискавки в трос, які по рис.3.5 (суцільна лінія) найбільш вірогідні на нижні фази «В» і «А». Тому для ПЛ з тросом поетапне підвищення грозоупорності за рахунок установки ОПН на кожній опорі може бути організовано так:

- обмежувач перенапруг не встановлені (крива №4 на рис.2.16);
  - встановлення обмежувача перенапруг в фазу «В» (крива №5);
  - встановлення обмежувача перенапруг в фази «В» і «А» (крива №6);
- установка обмежувача перенапруг в фази «В», «А», «С» ( $P = 0$  на рис.2.16).

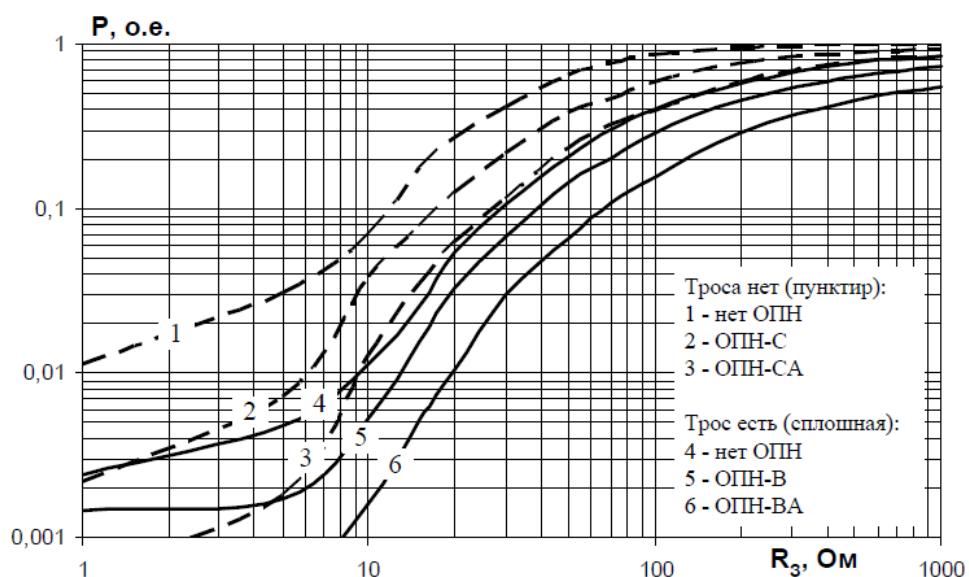


Рисунок 2.16. Імовірність перекриття ізоляції ПЛ в залежності від опорного імпеданса заземлення  $R_3$  опор і фаз установки обмежувача перенапруг на кожній опорі:

пунктирна лінія - при розрядах блискавки в опору лінії без троса; суцільна лінія - при розрядах блискавки в трос лінії з тросом.

Оскільки грозові вимкнення ПЛ 110 кВ викликані не тільки розрядами блискавки в її заземлені частини (рис.2.16), а й розрядами в фазні дроти, то для отримання остаточного висновку про ефективність тієї чи іншої схеми розміщення ОПН на опорі потрібно провести розрахунок числа відключень ПЛ з урахуванням всіх можливих місць розряду блискавки.

Вплив встановлення обмежувачів перенапруг на кількість відключень

Річна кількість розрядів блискавки в ПЛ 110 кВ залежить від довжини ПЛ і грозової активності. З точки зору грозових перенапруг для ізоляції ПЛ 110 кВ основну небезпеку становлять прямі розряди блискавки в ПЛ [2] (в фазний провід, в опору, в трос). Середнє співвідношення числа розрядів в різні елементи ПЛ 110 кВ, визначене за різними існуючими методиками [2,3 та ін.], наведено в табл.1.3.

Кожне імпульсне перекриття ізоляції ПЛ 110 кВ в мережах з заземленою нейтраллю переходить в силове коротке замикання. Тоді число відключень ПЛ, пов'язаних з грозовими перенапругами:

$$N_{\text{ПЛ}} = (D_{\text{Ф}}D_{\text{Ф}} + D_{\text{О}}D_{\text{О}} + D_{\text{Т}}D_{\text{Т}})n \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \frac{T_{\text{Г}}}{100} \quad (2.1)$$

$P_{\text{Ф}}, P_{\text{О}}, P_{\text{Т}}$  - імовірності (в.о.) перекриття ізоляції ПЛ відповідно при розрядах блискавки в фазу, в опору (або в трос поблизу від опори), в трос в середній частині прольоту;

$n$  - питома кількість розрядів блискавки в ПЛ, що становить в середньому  $n = 100$  раз на кожні 100 км довжини ПЛ і 100 грозових годин;

$L_{\text{ВЛ}}$  - довжина ПЛ (км);  $T_{\text{Г}}$  число грозових годин [2] в році в районі розташування ПЛ.

Для оцінки по (2.1) конкретного числа відключень одноланцюгової ПЛ 110 кВ необхідні:

– величина величина  $P = P_{\text{Ф}}$  ;

-  $P = P_{\phi}$  - ймовірність перекриття ізоляції при розрядах блискавки в опору; на рис.3.13 (пунктирні лінії);

- величина  $P = (D_o \cdot P_o + D_T \cdot P_T)$  - середня ймовірність перекриття ізоляції при розрядах блискавки в різні ділянки троса; вона дана на рис.2.16 (суцільні лінії).

У разі розрядів блискавки в фазні проводи ПЛ 110 кВ (швидше за все в верхню фазу «С») ймовірність  $P_{\phi}$  можна прийняти:

перекриття ізоляції ураженої фази

- рівній  $P_{\phi} \approx 1$  при відсутності обмежувачів перенапруг на фазі «С» (крива №4 на рис.2.14);

- рівній  $P_{\phi} \approx 0$  при наявності на кожній опорі ОПН в фазі «С».

У табл.2.10 наведені результати розрахунків річного числа грозових відключень ПЛ 110 кВ, без обмежувачів перенапруг. Розрахунки виконані для  $L = 100$  км і  $T_{ц} = 100$  годин, але при необхідності можуть бути пропорційно перераховані на будь-яку іншу довжину і інтенсивність грозової діяльності.

Дані з табл.2.10 дозволяють відзначити, що в рамках заданого класу ізоляції ПЛ зменшення опору заземлення опор та встановлення блискавкозахисних тросів є досить ефективними засобами зниження числа грозових відключень ПЛ.

Таблиця 2.10, а. Оцінка числа грозових вимкнень одноланцюгової ПЛ 110 кВ без тросу.

$R_3, \text{ Ом}$	$D_{\phi}$	$P_{\phi}$	$D_o$	$P_o$	$N_{\text{ОПН}}$ , на 100 км і 100 годин
1	0,5	1,0	0,5	0,0114	50,6
5	0,5	1,0	0,5	0,0306	51,5
10	0,5	1,0	0,5	0,0696	53,5
15	0,5	1,0	0,5	0,1764	58,8
20	0,5	1,0	0,5	0,2670	63,4
30	0,5	1,0	0,5	0,4172	70,9

50	0,5	1,0	0,5	0,6466	82,3
70	0,5	1,0	0,5	0,7746	88,7
100	0,5	1,0	0,5	0,8574	92,9
200	0,5	1,0	0,5	0,9604	98,0
500	0,5	1,0	0,5	0,9952	99,8
1000	0,5	1,0	0,5	0,9992	100,0

Таблиця 2.10, б. Оцінка числа грозівих вимкнень одноланцюгової ПЛ 110 кВ з тросом.

$R_3, \text{ Ом}$	$D_\phi$	$P_\phi$	$(D_O \cdot P_O + D_T \cdot P_T)$	$N_{опн}$ , на 100 км і 100 годин
1	0,005	1,0	0,0024	0,7
5	0,005	1,0	0,0049	1,0
10	0,005	1,0	0,0113	1,6
15	0,005	1,0	0,0255	3,1
20	0,005	1,0	0,0543	5,9
30	0,005	1,0	0,1077	11,3
50	0,005	1,0	0,2063	21,1
70	0,005	1,0	0,3007	30,6
100	0,005	1,0	0,4003	40,5
200	0,005	1,0	0,5797	58,5
500	0,005	1,0	0,7647	77,0
1000	0,005	1,0	0,8527	85,8

Доцільність установки на кожній опорі певної кількості обмежувачів перенапруг можна оцінити з використанням табл.2.11, для опорів заземлення: 10, 30 і 100 Ом.

Аналіз табл.2.11 призводить до наступних висновків:

- для ПЛ без троса установка всього одного обмежувача перенапруг на кожній опорі (в верхню фазу) дає дуже серйозне зниження числа грозівих вимкнень;
- для ПЛ без троса установка всього одного обмежувача перенапруг на

кожній опорі (в верхню фазу) дозволяє знизити число грозових вимкнень до рівня, який має місце для ПЛ з тросом, що не оснащена обмежувачем перенапруг;

- для ПЛ з тросом установка 1-2 фаз обмежувачем перенапруг на кожній опорі (в нижні фази) не дає серйозного зниження числа грозових вимкнень і, тому, для ліній з тросом треба встановлення обмежувача перенапруг одночасно в усі фази кожної опори.

При використанні обмежувача перенапруг існує ризик виходу його з ладу, дані, наведені в табл.2.11, треба доповнити оцінками числа пошкоджень обмежувача перенапруг. В експлуатації руйнування обмежувача перенапруг пов'язано з неякісним виготовленням, або нерозрахованих струмовими і енергетичними впливами. Для сучасних обмежувачів перенапруг провідних вітчизняних і зарубіжних підприємств ризик пошкодження через неякісне виготовлення завжди виявляється істотно менше, ніж ризик пошкодження через нерозрахованих впливів. В якості одного з можливих нерозрахованих впливів виступає розряд потужної блискавки в фазний провід поруч з обмежувачем перенапруг.

Таблиця.2.11, а. Оцінка ефективності розміщення обмежувача перенапруг на кожній опорі ПЛ 110 кВ без тросу.

$R_3$ , Ом	ОПН	$D_\phi$	$P_\phi$	$Do$	$Po$	$N_{ПЛ}$ , на 100 км і 100 годин
10	немає	0,5	1,0	0,5	0,0696	53,5
	С	0,5	0	0,5	0,0305	<b>1,5</b>
	СА	0,5	0	0,5	0,0128	0,6
	САВ	0,5	0	0,5	0	0
30	немає	0,5	1,0	0,5	0,4172	70,9
	С	0,5	0	0,5	0,2178	<b>10,9</b>

	СА	0,5	0	0,5	0,1156	5,8
	САВ	0,5	0	0,5	0	0
100	нема є	0,5	1,0	0,5	0,8574	92,9
	С	0,5	0	0,5	0,5962	<b>29,8</b>
	СА	0,5	0	0,5	0,3988	19,9
	САВ	0,5	0	0,5	0	0

Таблиця 2.11, б. Оцінка ефективності розміщення обмежувача перенапруг на кожній опорі ПЛ 110 кВ з тросом.

$R_3, \text{ Ом}$	ОПН	$D_\phi$	$P_\phi$	$(D_O \cdot P_O + D_T \cdot P_T)$	$N_{ПЛ}$ , на 100 км і 100 годин
10	нема є	0,005	1,0	0,0113	<b>1,6</b>
	В	0,005	0	0,0050	1,0
	ВА	0,005	0	0,0016	0,7
	ВАС	0,005	0	0	0
30	нема є	0,005	1,0	0,1077	<b>11,3</b>
	В	0,005	0	0,0664	7,1
	ВА	0,005	0	0,0282	3,3
	ВАС	0,005	0	0	0
100	нема є	0,005	1,0	0,4003	<b>40,5</b>
	В	0,005	0	0,2910	29,6
	ВА	0,005	0	0,1662	17,1
	ВАС	0,005	0	0	0

### 3. Аналітичні методи дослідження перенапруг

#### 3.1 Системи відносних одиниць при розрахунках перенапруг в електричних системах

В розрахунках внутрішніх перенапруг, як правило, за одиницю часу береться «синхронна секунда», рівна 1/314 с.

«Синхронний час» позначається через  $\tau$ , причому

$$\tau = \omega_s t,$$

де,  $\omega_s$  - кругова синхронна частота,  $c^{-1}$ ;  $t$  – момент часу, с.

У відносних одиницях часу кругова синхронна частота  $\omega_{s*} = \omega_{баз} = 1$ . Будь-яка інша частота у відносних одиницях рівна

$$\omega = \frac{\omega}{\omega_s}.$$

За базисну напругу  $U_{баз}$  приймається максимальна фазна напруга мережі  $U_{\phi}$ . Тому напруга, зокрема перенапруга, у відносних одиницях рівна

$$U_* = \frac{U}{U_{\phi}},$$

тобто, визначають кратності відносно фазної напруги; саме ця кратність і цікавить нас в розрахунках перенапруг.

Зазвичай, другою базисною електричною величиною вибирається або хвильовий опір лінії  $z$ , або номінальний струм трансформатора  $I_{н.тр}$ , який входить в розрахункову схему. Решта базисних електричних величин визначається з двох вибраних величин згідно з табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Визначення базисних електричних величин

Схема відносних одиниць I	Схема відносних одиниць II
$U_{баз} = U_{\phi}$	$U_{баз} = U_{\phi}$
$z_{баз} = z_{\phi}$	$I_{баз} = I_{н.тр.}$
$I_{баз} = \frac{U_{баз}}{Z_{баз}} = I_{нат.л.}$	$Z_{баз} = \frac{U_{баз}}{I_{баз}}$
$P = U_{баз} \cdot I_{баз} = P_{нат.л.} \cdot 3$	$P = U_{баз} \cdot I_{баз} = P_{ном.тр.} \cdot 3$

де  $P_{нат.л.}$  – натуральна потужність лінії;

$P_{ном.тр.}$  – потужність трифазного трансформатора).

У розрахунки перехідних процесів входять індуктивності  $L$  і ємності  $C$ . Оскільки в системі відносних одиниць синхронна частота

$\omega_{s*} = 1$ , то  $x_* = \omega_{s*} L_* = L_*$  і  $b_* = \omega_{s*} C_* = C_*$ , тобто, кількісне значення індуктивного опору та індуктивності, як і ємнісної провідності і ємності, збігаються.

За базисну величину потокозчеплення приймається значення при фазній напрузі синхронної частоти на індуктивності

$$\Psi_{\text{баз}} = \frac{U_{\phi}}{\omega_s}$$

Тоді в системі відносних одиниць напруга робочої частоти буде кількісно рівна потокозчепленню  $U_* = \Psi_*$ . На частоті  $\omega \neq \omega_s$ .

$$U_* = \omega_* \Psi_*$$

Довжини ліній  $l$  (км) під час розрахунків виражаються в радіанах, тобто в розрахунки входить електрична довжина лінії:

$$\lambda = l \frac{\omega_s}{v} = \pi \frac{1}{3000},$$

Де  $v$ , - швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі.

У розрахунках внутрішніх перенапруг зазвичай використовують кругову частоту  $\omega_s = 314 \text{ c}^{-1}$ . Проте в деяких режимах, наприклад, при скиданні навантаження, швидкість обертання роторів генераторів, особливо гідрогенераторів, може істотно зрости. Це призводить до підвищення напруги і частоти. У таких випадках за базисну частоту слід приймати не  $\omega_s = 314 \text{ c}^{-1}$ , а дійсну частоту  $\omega_{\text{дж}}$  джерела. На цій частоті кількісно зростають  $x$  і  $b$  елементів мережі, а також зростає електрична довжина ліній.

У всіх подальших розрахунках, за деяким винятком, використовуються відносні одиниці. Для спрощення запису знак зірочки на величинах, виражених у відносних одиницях, буде опущений. Таким чином, приймається  $\omega_s = 1$ ;  $L = x$ ;  $C = b$ ;  $U = \Psi$ .

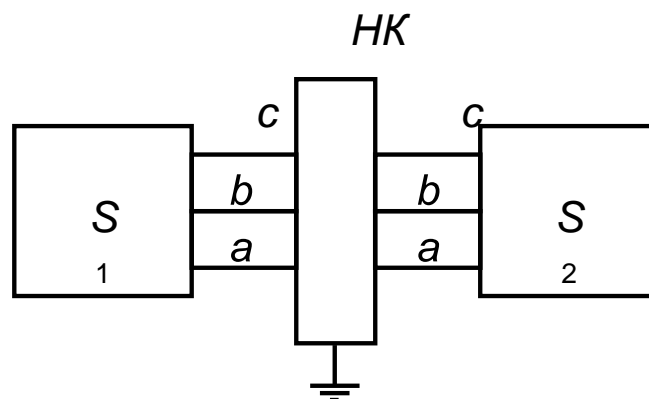


### 3.2 Метод симетричних складових в розрахунках перенапруг

Під час розрахунків перехідних процесів в несиметричних комутаціях широко використовується метод симетричних складових, зокрема розрахунок на основі комплексних схем заміщення. Побудова цих схем дається в курсах з перехідних процесів в електричних системах. Особливістю схем для розрахунку перенапруг є рівність опорів прямої (forward sequence) і зворотної послідовностей  $z_1$  і  $z_2$ . Єдиним елементом систем, у якого  $z_1 \neq z_2$ , є обертові машини. Проте в розрахунках перенапруг враховуються надперехідні реактивні опори, які у машин з демпферними контурами в обох осях приблизно однакові для систем струмів прямої і зворотної послідовностей.

За умови  $z_1 = z_2$  розрахунок напруг і струмів в несиметричних схемах може ґрунтуватися на універсальній комплексній схемі у фазних координатах, побудова якої показана на рис. 3.1. З обох боків від довільної несиметричної комутації, умовно показаній на рис. 3.1,а блоком НК, включені мережі S1 і S2 довільного вигляду з довільними перехідними опорами.

На схемі показано заземлення в місці комутації. За методом активного двополюсника для трифазної мережі можна перетворити S1 і S2 до схеми на рис. 3.1,б, в якій  $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$  – еквівалентні джерела напруги, яка рівна фазним напругам на розімкнених кінцях a, b, c в симетричному режимі (напруга холостого ходу);  $z_1$  – еквівалентний опір прямої послідовності, рівний фазним опорам в симетричному режимі з точок a, b, c при закорочених джерелах e.p.c (опір короткого замикання);  $z_N = \frac{z_0 - z_1}{3}$  – опір в нульовому каналі;  $z_0$  – еквівалентний опір нульовій послідовності.



а)

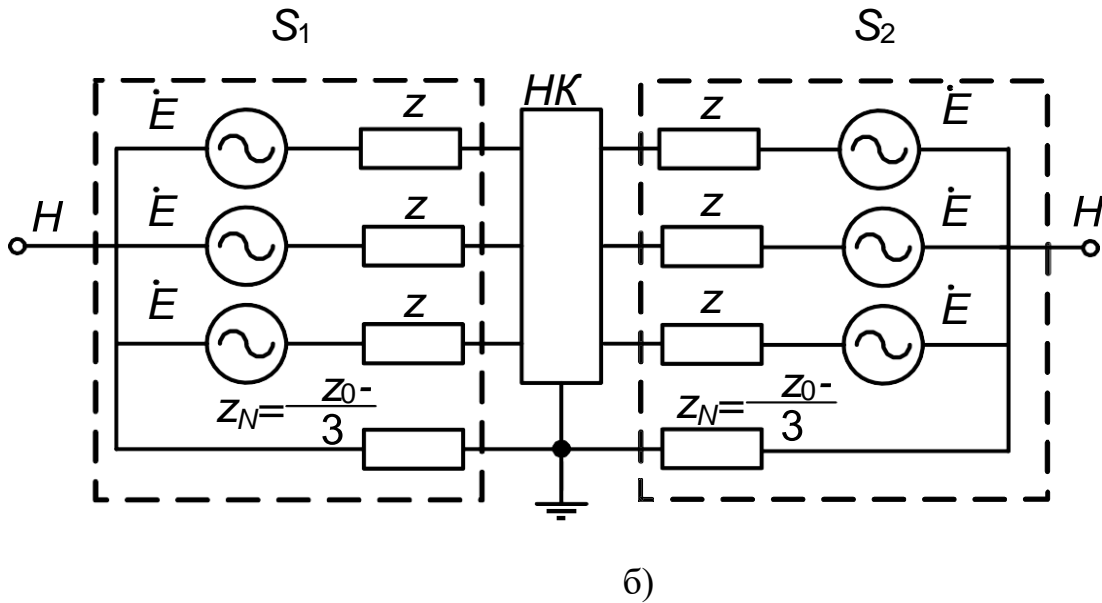


Рисунок 3.1 – Універсальна комплексна схема: а - початкова; б – розрахункова  
 За схемі на рис. 3.1, б опір  $z_0$  рівний потрібному опору з точок а, b, с при паралельно з'єднаних фазах:

$$3\left(\frac{z_1}{3} + \frac{z_0 - z_1}{3}\right) = z_0.$$

Ця тотожність підтверджується правильністю структури схеми на рис. 3.1, б. Таким чином, в цій схемі виконуються необхідні та достатні умови зв'язку між симетричними складовими напруги і струму.

Універсальна комплексна схема на рис. 3.1 дозволяє безпосередньо визначати фазні напруги і струми в несиметричних режимах. Відзначимо, що схема може бути використана не тільки в усталених, але і в перехідних режимах.

### 3.3 Параметри розрахункових схем у каналах прямої і нульової послідовностей

Другим етапом після складання розрахункової схеми є визначення параметрів елементів схеми. Такі параметри, як реактивний і активний опір елементів, залежать від частоти. Спектр частот внутрішніх перенапруг зазвичай не виходить за межі  $f = 10^4$  Гц, або кругової частоти  $\omega = 2\pi \cdot 10^4$ . Розрахункові формули, що наводяться нижче, відносять до цього діапазону частот.

Обладнання в схемі – генератори, трансформатори, реактори – замінюються своїми реактивними опорами. Частотні характеристики цих елементів лінійні:

$$x(\omega) = \omega x; \quad b(\omega) = \omega b,$$

де,  $\omega$  - кругова частота виражена в частках від частоти;

$x$  і  $b$  — у відносних одиницях і відповідають синхронній частоті.

Джерела напруги (е.р.с.) задаються симетричними трійками векторів прямої послідовності. У табл. 1.2 наведено значення реактивних опорів у каналах прямої і нульової послідовностей для елементів схем — генераторів Г, трансформаторів Т, автотрансформаторів АТ, реакторів поперечної компенсації Р, ємностей поздовжньої компенсації ПК на робочій частоті.

Як реактивний (індуктивний) опір генератора береться зазвичай значення надперехідного реактивного опору  $x_d'' \approx x_q''$ . При цьому вважають, що викликані в демпферних контурах струми за час комутаційного перехідного процесу не встигають згаснути. Допущення припустиме тільки для турбогенераторів. У гідрогенераторах загасання вільних струмів в демпферних контурах обчислюється декількома періодами, тобто наближається за часом до перехідного процесу в довгих лініях. Тому в таких схемах за розрахункове значення реактивного опору гідрогенераторів доцільніше брати перехідний опір  $x_d'$ .

Таблиця 3.2 – Схеми прямої і нульової послідовностей елементів електричних мереж

Елемент системи	Схема прямої послідовності	Схема нульової послідовності
Г		
Г АТ		
Р		
ПК		

Найбільш трудомістке визначення параметрів ліній електропередачі. Порядок розрахунку цих параметрів наводиться нижче.

Лінія задається своїми геометричними розмірами (рис. 1.3) і середньою питомою провідністю землі ( $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ ). За заданими розмірами визначаються середні відстані:

- середньгеометрична відстань між фазами

$$d = \sqrt[3]{d_{12}d_{23}d_{31}};$$

- середньгеометрична відстань між проводами та їх дзеркальним відображенням

$$D_0 = \sqrt[3]{D_{11}D_{22}D_{33}};$$

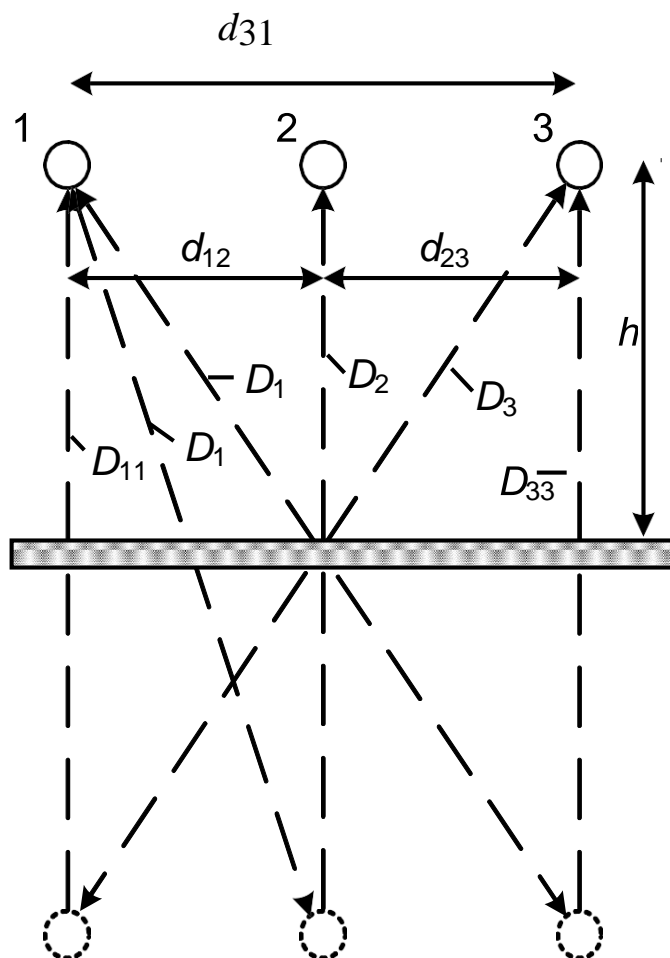


Рисунок 3.3 – Геометричні розміри лінії

- середньгеометрична відстань між проводом і дзеркальним відображенням інших проводів

$$D = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}};$$

– середньгеометричні розміри всіх проводів

$$D_e = \sqrt[3]{r_e d^2}.$$

Проводи задаються їх радіусом  $r$ ; для розщеплених проводів використовуються еквівалентні радіуси  $r_{екв}$ .

Формули для обчислення індуктивних опорів і ємнісних провідностей на 1 км лінії наводяться в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахункові формули для параметрів одноланцюгової ПЛ (без урахування тросів)

Параметри	Питомі фазові параметри ПЛ	
	Поздовжній опір, Ом/км	Поперечна провідність 1/Ом*км
Пряма послідовність	$r_1 = r_{np}$ $x_1 = 29 f \cdot 10^{-4} \lg \frac{d}{r_{екв}}$	$g_1 = 0$ $b_1 = \frac{7,56}{\lg \frac{D_0 d}{r_{екв} D}} 10^{-6}$
Нульова послідовність	$r_0 = r_{np} + 3\pi^2 f \cdot 10^{-4}$ $x_0 = 87 f \cdot 10^{-4} \lg \frac{D_3}{D_{екв}}$	$g_0 = 0$ $b_0 = \frac{7,56}{\lg \frac{D_0 D^2}{r_{екв} d^2}} 10^{-6}$

Магнітне поле струмів прямої послідовності в основному зосереджене в повітрі і лише частково проникає в землю. Магнітне поле струмів нульової послідовності проникає в землю на велику глибину. Еквівалентний зворотний провід, що імітує землю, знаходиться на відстані  $D_3$  від проводів лінії. Електричне поле напруги прямої і нульової послідовностей повністю розташоване в повітрі; поверхня землі має нульовий потенціал. Швидкості розповсюдження хвиль каналами прямої і нульової послідовностей рівні:

$$v_1 = \frac{\omega}{\sqrt{x_1 b_1}} \text{ та } v_0 = \frac{\omega}{\sqrt{x_0 b_0}}$$

На лінії з ідеально провідною землею електричні і магнітні поля зосереджені в повітрі та є дуальними. На такій лінії  $v_1=v_0=c$  ( $c$  – швидкість світла). Внаслідок розділення електричних і магнітних полів на лінії з реальною землею, що має кінцеву провідність, швидкість  $v_1$  близька до швидкості світла ( $v_1 \approx 0,98 c$ ), а швидкість  $v_0$  складає приблизно  $0,6-0,7 c$ . Хвильові опори лінії у каналах прямої і нульової послідовностей рівні  $z_1 = \sqrt{\frac{x_1}{b_1}}$  і  $z_0 = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}}$ . Оскільки  $x_0 > x_1$ , то  $z_0 > z_1$ . За значеннями хвильових опорів  $z_0$  і  $z_1$  можна розрахувати властиві  $z$  і взаємні  $z'$  хвильові опори проводів (які вважаються симетричними):

$$z = \frac{z_0 + 2z_1}{3}; \quad z' = \frac{z_0 + z_1}{3}.$$

Заземлені троси знижують індуктивні опори і підвищують ємнісну провідність ліній. Проте на сучасних ПЛ вищої напруги троси зазвичай розземляють. В цьому випадку справедливі розрахункові формули ліній без тросів, наведені в табл. 3.3.

У таблиці 3.4 наведено типові параметри ліній електропередачі 500 кВ з горизонтальним розташуванням проводів, обчислені для ґрунтів з середнім питомим опором  $\rho = 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

Таблиця 3.4 – Типові параметри ПЛ 500 кВ на робочій частоті

Параметри	Пряма послідовність	Нульова послідовність
Активний опір, Ом/км	0,022	0,17
Індуктивний опір, Ом/км	0,29	0,94
Добротність $x/r$	13,2	6,5
Ємнісна провідність, $1/\text{Ом}\cdot\text{км}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Хвильовий опір, Ом	270	590
Швидкість розповсюдження хвилі, км/с	$2,95 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^5$

## 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ В ДІЮЧИХ МЕРЕЖАХ

Найбільш цінний матеріал про внутрішні перенапруги дають їх вимірювання в діючих мережах. Одним з видів таких вимірювань є дослідження, що проводяться в ході спеціально запланованих комутацій у виділених ділянках мережі за підготовленими програмами. Зазвичай ці дослідження проводяться при впровадженні електропередач нового вищого класу номінальної напруги, або нового устаткування, або нових схем виконання електропередач. Вимірювання перенапруг проводяться, як правило, багатопроменевими катодними осцилографами з механічною розгорткою, одночасно в декількох точках мережі, із запуском їх від кіл управління вимикачами і з передачею сигналів по каналах високочастотного зв'язку. У дослідженнях цього типу зазвичай визначаються максимальні перенапруги, що виникають при запланованій комутації, або їх статистичні характеристики.

Інший вид вимірювань полягає в масовій реєстрації внутрішніх перенапруг в експлуатації за допомогою автоматичних катодних осцилографів чи іншої, більш простої, вимірювальної апаратури, яка реєструє тільки амплітуди перенапруг. Ці дослідження проводяться в багатьох країнах. В Україні вони широко поставлені в енергосистемах на вузлових підстанціях. Масові вимірювання перенапруг дають матеріал для статистичного аналізу амплітуд (і форм) внутрішніх перенапруг і служать основою для вибору рівнів ізоляції ліній та устаткування підстанції. Щоб служити цій меті, число вимірювань повинне бути достатньо велике і проведене на всіх ділянках електричних мереж, де можна чекати особливостей в розвитку перенапруг.

### 4.1 Вимірювання перенапруг в діючих мережах. Інформаційно-діагностичний комплекс „Регіна”

Для розробки конкретних заходів із обмеження перенапруг і підвищення надійності роботи електрообладнання необхідно мати конкретну інформацію про види та рівні перенапруг, що виникають у конкретній електричній установці.

Аналіз результатів реєстрації перенапруг дозволяє визначити максимальні впливи на встановлене обладнання, оцінити необхідність спеціальних заходів і рекомендувати конкретні технічні рішення з обмеження перенапруг.

Сучасні інформаційні технології дозволяють здійснювати реєстрацію аварійної події у високовольтній електричній мережі із записом передаварійного режиму та реалізувати технологію моніторингу на основі аналого-цифрових перетворювачів і ПЕОМ.

Вимоги до датчиків і реєстраційної апаратури можуть бути встановлені, виходячи з параметрів перехідного процесу.

Основні характеристики перенапруг – амплітуда, частота перехідного процесу, тривалість, частота їхніх появ – визначаються випадковими факторами й мають значні розбіжності, тому технічні вимоги до комплекту обладнання для реєстрації внутрішніх перенапруг в аварійних режимах повинні розроблятися на підставі аналізу можливих перенапруг. Наприклад, верхня границя очікуваних частот перехідного процесу при дуговому замиканні для напруги становить 10-50 кГц, а частота перехідних процесів перенапруг при комутаціях вимикачами (особливо вакуумними) з багаторазовим запалюванням дуги істотно вище й може становити 100-500 кГц.

Враховуючи, що тривалість аварійних процесів при внутрішніх перенапругах може становити від 0,001 с до декількох секунд, система реєстрації повинна мати досить високу швидкодію вимірювання датчиків і реєстраційної апаратури, а також забезпечувати одночасну реєстрацію 3 фазних напруг або струмів в аварійних режимах при внутрішніх перенапругах, збереження й накопичення інформації про аварійні події.

У систему реєстрації перенапруг додатково можуть входити пристрої з'єднання та гальванічної розв'язки.

Типові трансформатори напруги при необхідних частотах дають значну похибку. Тому знімання сигналу повинно здійснюватися зі спеціальних дільників напруги.

Запис сигналів з дільників напруги здійснюється за допомогою реєстратора, виконаного на основі плат АЦП.



Знімання інформації, керування режимами реєстратора здійснюється через ПЕОМ. У зв'язку з цим реєстратор повинен мати підключення до ПЕОМ і бути оснащеним інтерфейсом та програмним забезпеченням. Це дозволяє налаштувати режими осцилографування і здійснювати оперативний перегляд, а також вимірювання параметрів перехідних процесів.

Запуск реєстрації перенапруг і запис параметрів перехідного процесу звичайно здійснюється за фактом перевищення напруги фаз або під час ручного запуску.

В наш час практика моніторингу та реєстрації перехідних процесів використовується у експлуатаційних та дослідницьких організаціях ряду країн.

На сьогоднішній день існує цілий ряд інформаційних комплексів, які дозволяють проводити реєстрацію перенапруг, наприклад: мобільний універсальний промисловий реєструвальний осцилограф “Рекон-08МС” "НПП РЕКОН", Україна; система реєстрації ООО “ПНП БОЛИД”, Росія; інформаційно-діагностичний комплекс “Регіна”, розроблений Інститутом Електродинаміки НАН України та ін.

В Україні найбільшого розповсюдження набув інформаційно-діагностичний комплекс “Регіна”. Він призначений для реєстрації аналогових і дискретних сигналів, аналізу розвитку аварійних ситуацій, оцінювання функціонування пристроїв релейного захисту і автоматики, визначення місця пошкодження при коротких замиканнях на лініях електропередачі, визначення залишкового ресурсу високовольтних вимикачів, побудови добової відомості режимів, проведення фазового і гармонічного аналізу синусоїдальних сигналів, виділення симетричних складових в трифазних мережах змінної напруги, виведення інформації у вигляді текстових повідомлень, графіків і таблиць на екран дисплея і на друк, а також передачі зареєстрованої і обробленої інформації на будь-які вищі рівні управління.

На сьогоднішній день реалізовано дві структури інформаційно-діагностичного комплексу “Регіна”:

- 1) у вигляді двох рівнів. Нижній рівень утворюють реєстратори аналогових і дискретних сигналів, розподілені по об'єкту. Число реєстраторів визначається кількістю аналогових і дискретних сигналів, що підлягають обробці. Верхній рівень

складається з ПЕОМ, модема і блока автоматичного запуску. Реєстратори з'єднуються з верхнім рівнем через послідовний інтерфейс;

2) у вигляді локальної мережі.

Базовим елементом інформаційно-діагностичного комплексу "Регіна" є реєстратор аналогових і дискретних сигналів (рис. 4.1). Реєстратор фіксує електричні сигнали змінного і постійного струмів, напруги, а також дискретні сигнали типу «сухий контакт» або потенційні.

Блоки введення аналогових сигналів, введення і виведення дискретних сигналів забезпечують гальванічну розв'язку входних ланцюгів один від одного, від шин живлення і корпусу блока.

Аналогові сигнали від трансформаторів струму і напруги контрольованих об'єктів надходять на входи блоків вимірювальних перетворювачів, де вони перетворюються до вигляду, необхідного для введення в мікро-ЕОМ. Дискретні сигнали з вільних контактів пристроїв релейного захисту і автоматики, герконів (рис. 4.1), а також сигнали потенційного рівня логічних елементів цих пристроїв надходять на діодну матрицю і передаються в реєстратор.

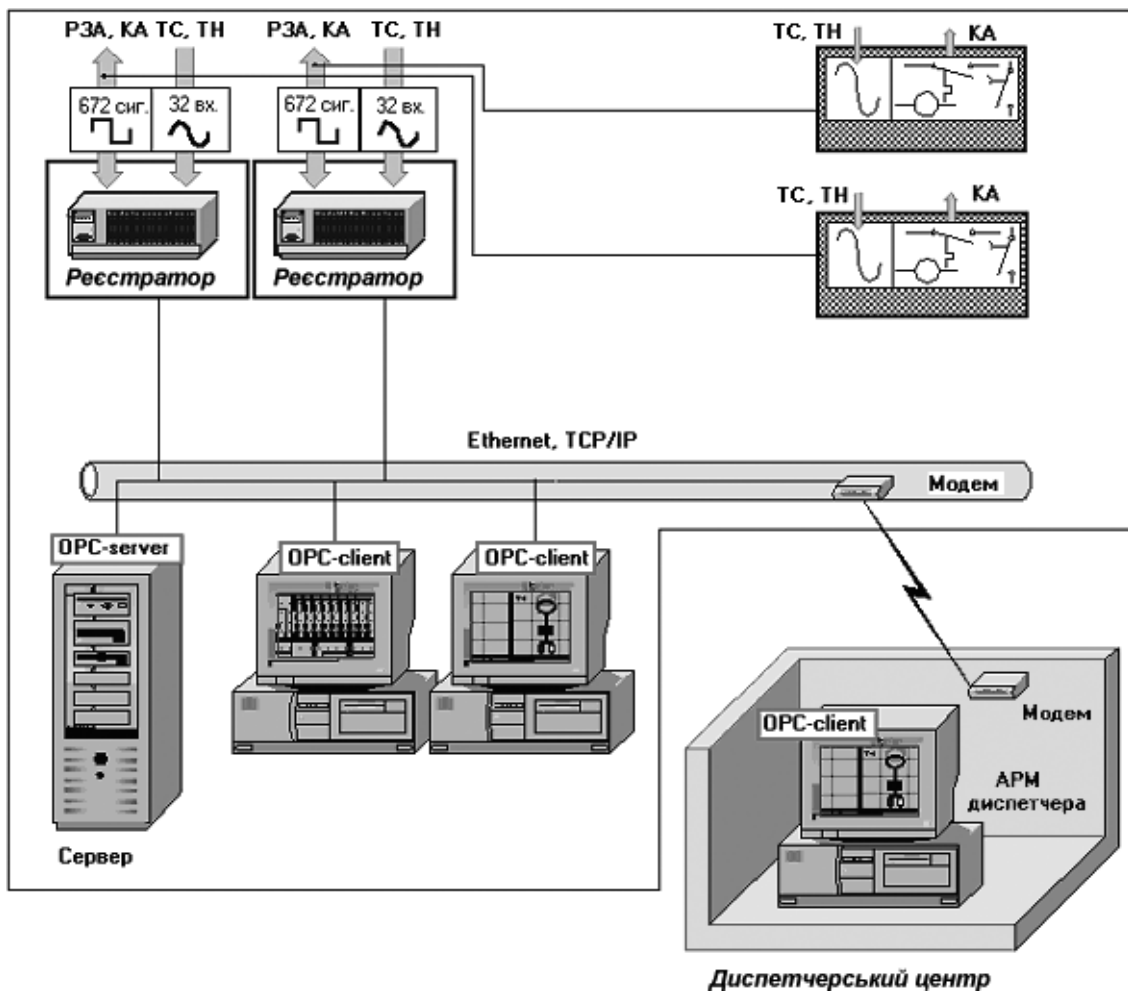


Рисунок 4.1 – Структурна схема підключення інформаційно-діагностичного комплексу “Регіна”

Програмне забезпечення реєстратора дозволяє реєструвати сигнали безперервно, у міру надходження від вхідних датчиків, а обробка їх проводиться у фоновому режимі. Передбачена робота нижнього рівня в нормальному і аварійних режимах. Режими задаються умовами функціонування контролюваного об'єкта. Існування аварійних режимів ідентифікується появою ініціативних дискретних сигналів, а також виходом за межі заданих пускових установок хоч б одного з ініціативних аналогових сигналів. Реєстратори забезпечують безперервну реєстрацію сигналів протягом заданого часу. Тривалість кожної аварії визначається перебігом аварійного процесу. Режим реєстрації аналогових сигналів за відсутності аварії - буферний з неперервним оновленням. Розмір буфера встановлюється заздалегідь та становить, як

правило, 200 мс. Режим реєстрації дискретних сигналів - неперервний. За відсутності аварії реєстратор накопичує всі дискретні пасивні сигнали, що не вимагають реєстрації аналогових сигналів, протягом хвилини, години, доби, до початку аварії, або до заданого обсягу. Після цього відбувається автоматична передача цієї інформації на АРМ диспетчера (рис. 4.1), де вона архівується і відображається у вигляді, наведеному на рис. 4.2.

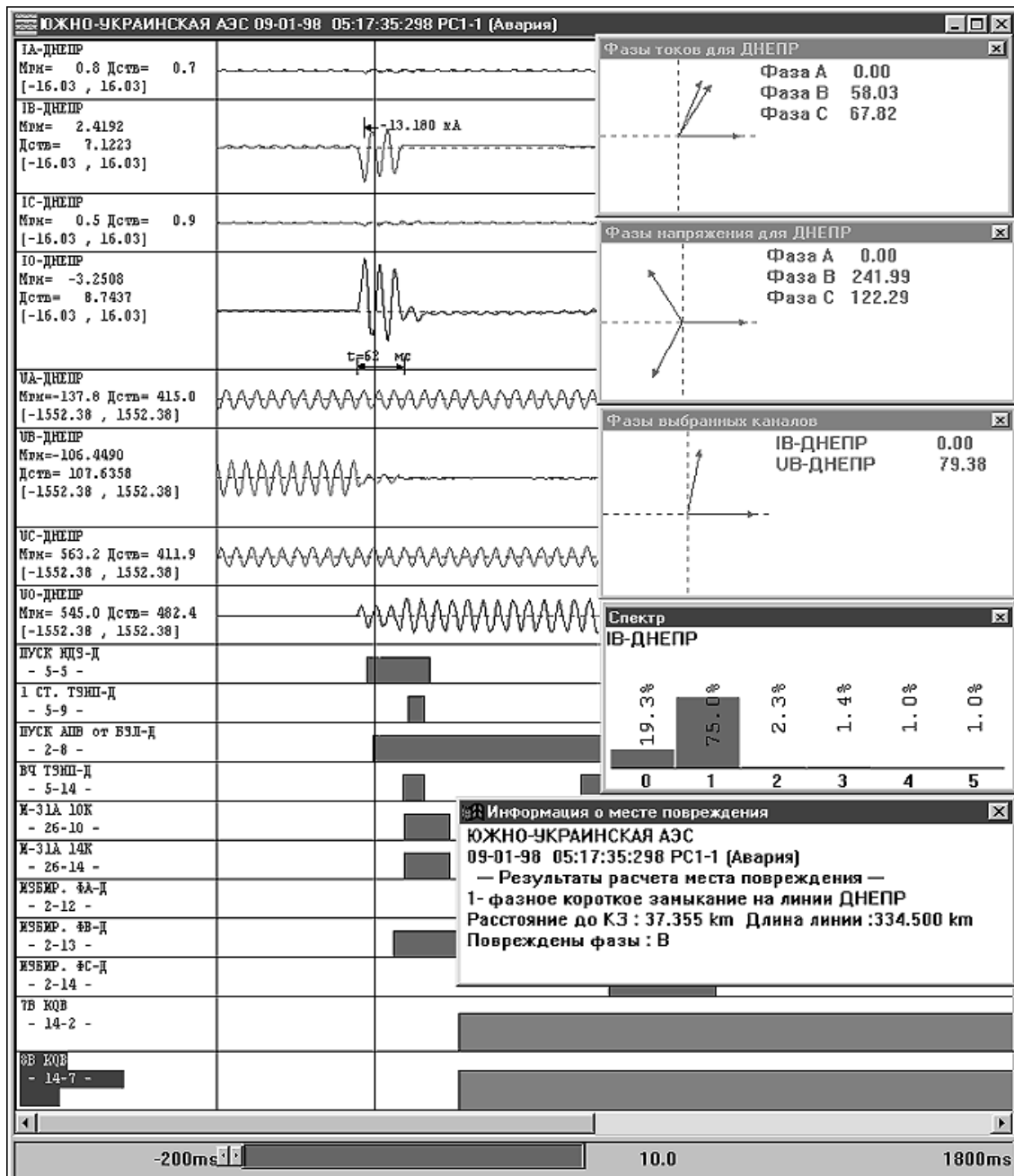


Рисунок 4.2 – Відображення інформації на АРМ диспетчера

## 5 КОМУТАЦІЙНІ ПЕРЕНАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

### 5.1 Перенапруги при включенні лінії

Кожне включення ненавантаженої лінії супроводжується комутаційними перенапругами відносно невеликої кратності. Вивчення перенапруг цього виду почалося при впровадженні електропередач 750-1150 кВ у зв'язку зі зниженням рівнів ізоляції.

Найпростішу схему, в якій можна вивчати особливості комутаційних перенапруг на лініях, показано на рис. 5.1,а. У цій схемі лінія довжиною  $l$  з хвильовим опором  $z$  підключається через реактивний опір мережі  $x_s$  до джерела синусоїдальної напруги.

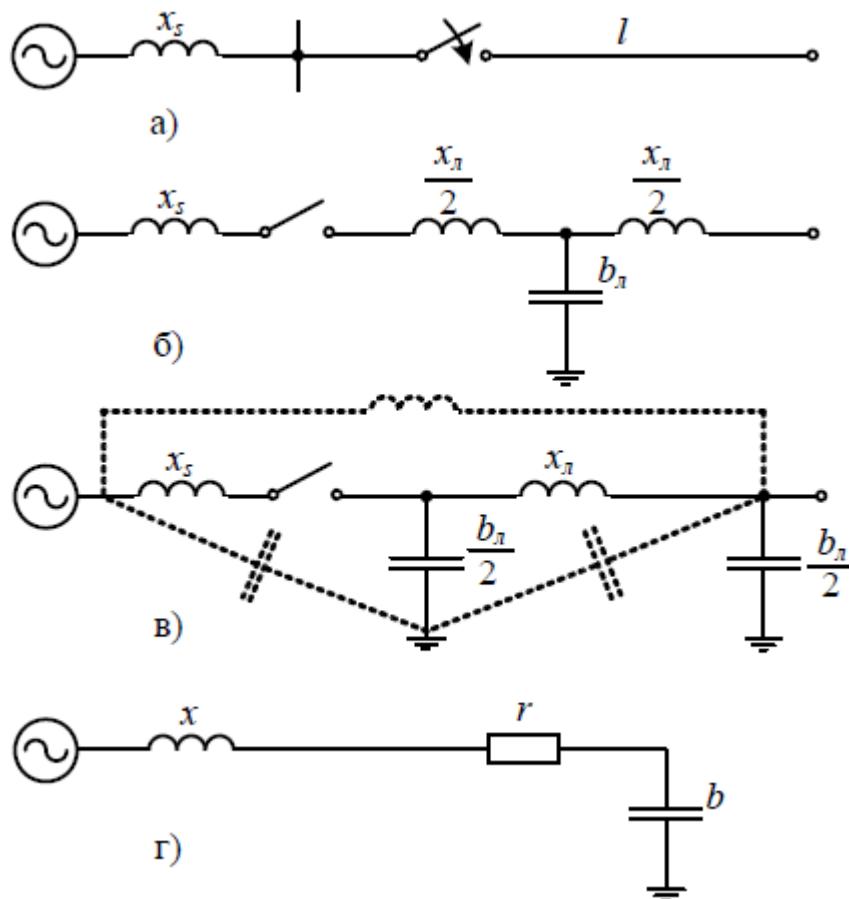


Рисунок 5.1 – Схеми для розрахунку перенапруг при включенні лінії, а – початкова схема; б – Т-подібна схема заміщення; в –  $\Pi$ -подібна схема заміщення; г – розрахунковий коливальний контур

Для коротких ліній дійсна Т-подібна або, точніше, П-подібна схема заміщення (рис. 5.1,б,в). У обох випадках вся схема може бути наведена простим коливальним контуром  $rx_b$  (рис. 5.1,г). Для схеми на рис. 5.1,б  $x = x_s + x_l/2$ ;  $b = b_l$ ; для схеми на рис. 5.1,в, перетворюючи зірку реактивних опорів в трикутник, як це показано на рис. 5.1,в пунктиром, отримуємо

$$b = \frac{b_l}{2} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{x_l}{x_s} - x_l b_l \right)^{-1} \right].$$

Це перетворення виконане на частоті джерела, і тому воно лише наближено дійсне в перехідному режимі.

Розрахунки показують, що перетворена схема на рис. 5.1,г більш повно відображає початкову схему відносно протікання перехідного процесу, ніж схема на рис. 5.1,б.

Зазвичай, в електричних мережах Т-подібна схема заміщення застосовується для ліній довжиною до 200–300 км, а П-подібна схема (з перетворенням зірки в трикутник) – для ліній довжиною до 300–400 км. Активні втрати, як правило, малі, тобто багато менші характеристичного опору контуру  $\sqrt{x/b}$ .

## 5.2 Перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями

Припустимо, що в схемі на рис. 5.2,а вимикач відключає ненавантаженою лінію. У вимикачі до відключення протікає синусоїдальний струм, і при обриві цього струму, що відбувається у момент проходження його через нуль, напруга на лінії має амплітудне значення:

$$U_{\text{уст}} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}.$$

Після обриву струму на лінії зберігається напруга  $U_0 = U_{уст}$ , що створюється зарядом на ємності лінії. Ця напруга впливає на лінійний полюс вимикача. З боку шин напруга у момент відключення падає з  $U_{уст}$  до  $E$  (зникає ємнісний ефект), і далі напруга змінюється з частотою мережі (рис. 5.2,б). Відновлювальна напруга на контактах вимикача змінюється за законом:

$$u_B(\tau) = E \cos t - U_0.$$

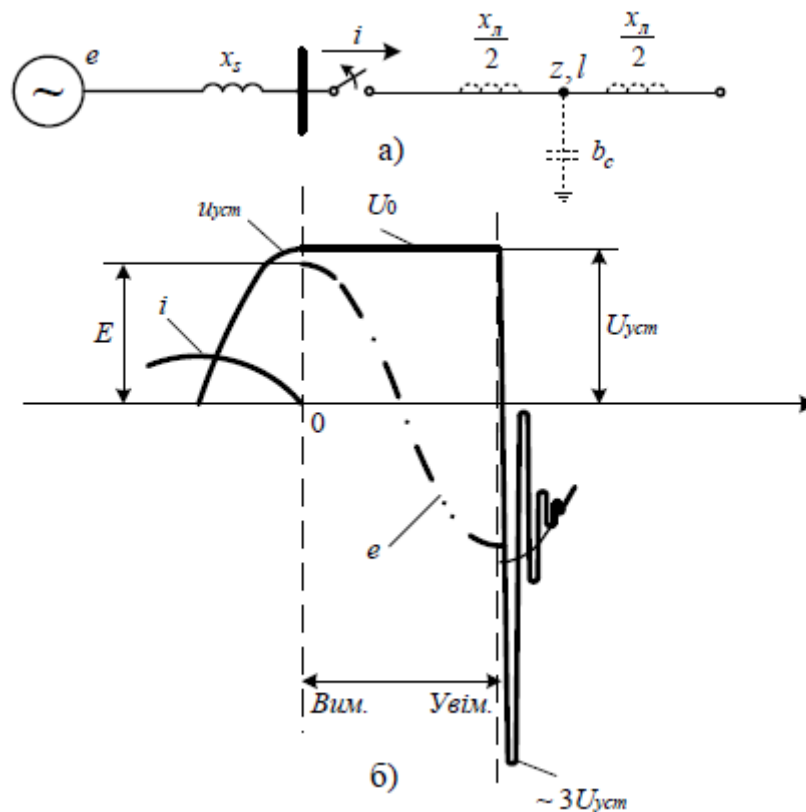


Рисунок 5.2 – Вимкнення ненавантаженої лінії з повторними пробоями

а – схема мережі; б – криві напруги на вимикачі зі сторони живлення та лінії

Якщо тепер при деякій фазі  $\psi$ , яка відлічується від моменту згасання ємнісного струму, виникне повторний пробій дугогасильного проміжку у вимикачі, то виникає перехідний процес ввімкнення лінії з початковою напругою формулою:

$$u_{\text{пер}} = U_{\text{уст}} \left( \cos(\tau + \psi) - \left[ \cos\psi \cos\omega_0\tau - \frac{1}{\omega_0} \sin\psi \sin\omega_0\tau \right] e^{-\delta\tau} \right) - U_0 \cos\omega_0\tau e^{\delta t}. \quad (5.1)$$

Максимальна напруга в перехідному процесі залежить від фази  $\psi$ , тобто моменту повторного пробую. Можливість виникнення повторного пробую визначається співвідношенням між ходом кривих зростання електричної ізоляції проміжків вимикача і відновлювальної напруги. Ці криві показано на рис. 5.3. Крива  $u_{\text{пр}}(t)$  зсунута вліво на час  $\Delta t < 0,01\text{с}$ ; що рівний інтервалу від моменту розходження контактів до моменту гасіння емнісного струму і початку зростання  $u_{\text{в}}(t)$ . За час  $\Delta t$  контакти встигають розійтися на відстань  $v\Delta t$  ( $v$  – швидкість руху контактів), і на початок зростання  $u_{\text{в}}(t)$  електрична ізоляція проміжків швидко наростає, як це показано пунктирною лінією на рис. 5.3.

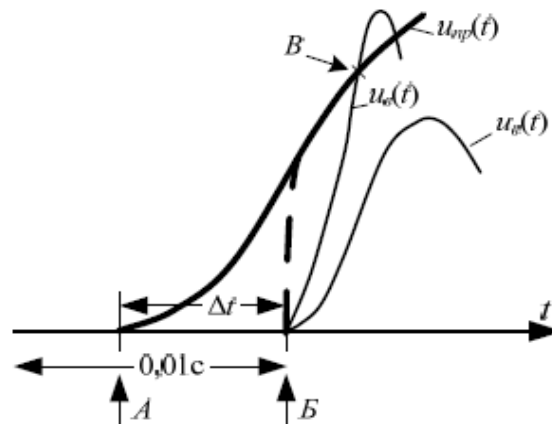


Рисунок 5.3 – Криві відновлювальної напруги  $u_{\text{в}}$  та відновлювальної ізоляції  $u_{\text{пр}}$

для вимикача лінії під час інтервалу  $\Delta t$  між початком розходження контактів та гасінням дуги.

А – момент розходження контактів; Б – момент гасіння дуги;

В – повторне запалення

Оскільки момент розходження контактів абсолютно випадковий, тобто величина  $\Delta t$  має однакову імовірність в межах від нуля до  $0,01\text{с}$ ; то умови для виникнення повторного пробую підпорядковуються статистичній закономірності.

В найгіршому випадку  $\Delta t = 0$ . Повторний пробій виникає за умови, коли крива



$u_6(t)$  перетинає криву  $u_{np}(t)$ ; якщо цей перетин відбувається у момент максимуму  $u_6(t)$ , то перенапруги на лінії досягають максимального значення. Підставляючи у формулу (5.1)  $\psi = 0$ , знаходимо, що амплітуда  $U_{пер}$  з урахуванням ємнісного ефекту сягає  $(3 \div 3,5) U_{\phi}$ .

### 5.3 Перенапруги під час повторного включення лінії

Розглянемо схему на рис. 5.4,а, в якій однофазне коротке замикання відключається з обох боків і далі відбувається автоматичне повторне включення (АПВ), причому через розкид часу дії вимикачі В1 і В2 відключають і включають лінію не одночасно. Припустимо для простоти вивчення перехідного процесу, що вимикач В1 останнім відключає лінію і першим її включає.

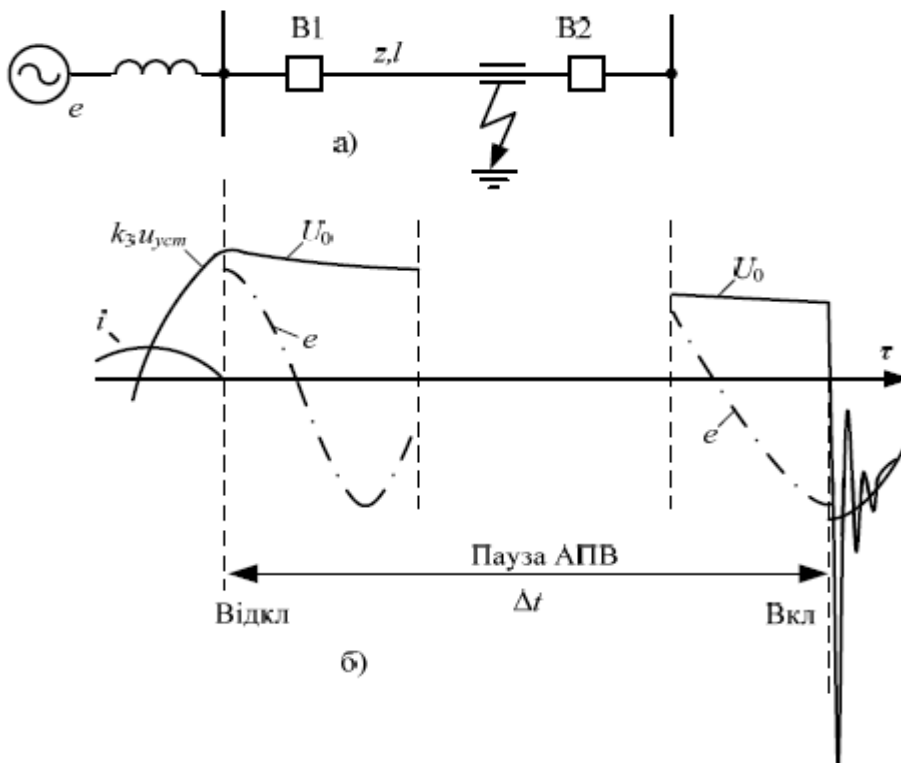


Рисунок 5.4 – Відключення і включення лінії в циклі АПВ,

а – схема мережі; б – крива напруги на вимикачі з боку живлення і лінії

Коли лінія буде відключена вимикачем В2, напруга на здорових фазах лінії буде рівна

$$U_0 = U_{уст} * k_3,$$

де  $U_{уст} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$  усталена напруга в симетричному режимі;

$k_3$  – коефіцієнт підвищення напруги на непошкоджених фазах під час однофазного короткого замикання.

При відключенні лінії у фазах вимикача, що живлять здорові фази лінії, тече ємнісний струм, і при обриві цього струму у момент проходження через нульове значення напруга на проводах має амплітудне значення, тобто рівне  $U_{уст}k_3$ . Як і при відключенні ненавантаженої лінії, ця напруга після відключення В1 підтримується на проводах залишковими зарядами. Але, на відміну від схеми на рис. 3.2, при повторному включенні лінії заряди на проводах протягом паузи АПВ частково стікають в землю по шляхах витоку ізоляторів. У дощ провідність цих шляхів висока, в суху погоду мала. Стікання заряду, і зниження напруги на здорових фазах враховуються коефіцієнтом  $k_q$ , залежним від тривалості безструмової паузи. У суху погоду середні значення  $k_q$  рівні 0,7 для  $\Delta t = 0,2$  с, 0,6 – для  $\Delta t = 0,4$  с і 0,5 – для  $\Delta t = 1$  с. . Отже, за час безструмової паузи напруга на лінії спадає до  $k_q k_3 U_{уст}$ . Ця напруга і буде початковою напругою  $U_0$  на ємностях здорових фаз при повторному включенні лінії.

Перехідний процес на здорових фазах лінії, як і раніше, виражається формулами простого коливального контуру. Якщо АПВ було успішним, тобто однофазне коротке замикання знов не виникає, то усталена напруга дорівнює  $U_{уст}$  симетричного режиму. Якщо АПВ виявилось неуспішним, усталена напруга на здорових фазах знов буде рівна  $U_{уст}k_3$ .

Припускаючи, що комутація повторного включення відбудеться при протилежній полярності джерела і в найсприятливішу фазу комутації (рис. 5.4,б), одержуємо формулу для  $u_{пер}$  :

при успішному АПВ

$$u_{\text{пер}} = U_{\text{уст}}[(\cos\tau - \cos\omega_0\tau e^{-\delta t}) - k_q k_3 \cos\omega_0\tau e^{-\delta t}]; \quad (5.2,а)$$

при неуспішному АПВ

$$u_{\text{пер}} = U_{\text{уст}}k_3[\cos\tau - (1 + k_q)\cos\omega_0\tau e^{-\delta t}], \quad (5.2,б)$$

де  $k_3$  визначається по кривих на рис. 5.2.

Для коротких ліній максимальні напруги визначаються формулами (аналогічними формулі (3.2)):

при успішному АПВ

$$U_{\text{пер}} = U_{\text{уст}} \left[ 1 + (1 + k_q k_3) e^{-\delta \frac{T}{2}} \right] \quad (5.3,а)$$

при неуспішному АПВ

$$U_{\text{пер}} = U_{\text{уст}} k_3 \left[ 1 + (1 + k_q) e^{-\delta \frac{T}{2}} \right] \quad (5.3,б)$$

#### 5.4 Відновлювальні напруги при відключенні коротких замикань

Відключення короткого замикання розглянемо на простій схемі рис. 5.5,а, в якій  $x_s$  і  $b_s$  – параметри мережі. Ємнісна провідність  $b_s$  звичайно дуже мала, і при робочій частоті нею можна нехтувати. Комутація – відключення короткого замикання – відбувається при проходженні індуктивного струму через нульове значення. Напруга на вимикачі може бути знайдена із схеми на рис. 5.5,б, в якій джерело струму  $i_{k3} = I_{k3} \sin \tau$  вмикається на коливальний контур  $x_s b_s$ . Напруга  $u_b(\tau)$  виражається формулою

$$u_b = I_{k3} x_s (1 - \cos\omega_0\tau e^{-\delta\tau}). \quad (5.4)$$

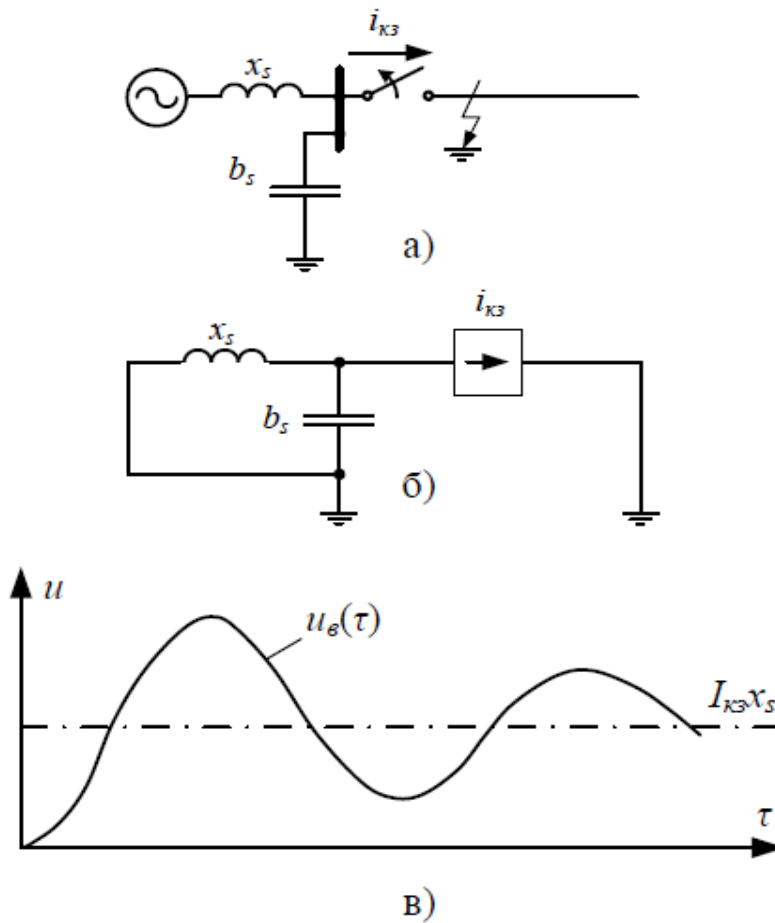


Рисунок 5.5 –

Відключення короткого замикання за вимикачем

а – початкова схема; б – розрахункова схема; в – крива  $u_0(\tau)$ 

Крива  $u_0(\tau)$  показана на рисунку 5.5,в. На початковій ділянці кривої  $u_0(\tau)$  визначають  $\frac{\Delta u_{\text{в}} \tau}{\Delta \tau}$  – швидкість відновлювальної напруги (ш.в.н.) після обриву дуги у вимикачі. Якщо ш.в.н. менше швидкості відновлення електричної ізоляції між контактами, то вимикач успішно відключає струм к.з. У іншому випадку дуга у вимикачі спалахує знов, що затуляє відключення короткого замикання або навіть приводить до руйнування дугогасильних камер вимикача. За сучасними нормами вимикачі повинні маркуватися не тільки за потужністю  $P = \sqrt{3} U_{\text{н}} I_{\text{кз}}$  яка відключається, але і за допустимою швидкістю відновлення напруги. Для напруг 110-220 кВ нормується ш.в.н. у 1 кВ/мкс на початковій частині кривої  $u_0(\tau)$ .

Найбільшою небезпекою для вимикача є короткі замикання на лінії на відстані декількох кілометрів від вимикача – так звані невіддалені короткі замикання

(рис. 5.6,а). Заміщаючи лінію коливальним контуром  $x_L b_L$ , приходимо до розрахункової схеми, показаної на рис. 5.6,б. Напруга  $u_B(\tau)$  виражається

$$u_B = I_{KЗ} x_S \left[ (1 - \cos \omega_{0,1} \tau) e^{-\delta_1 \tau} + \frac{x_L}{x_S} (1 - \cos \omega_{0,2} \tau) e^{-\delta_2 \tau} \right]. \quad (5.4,а)$$

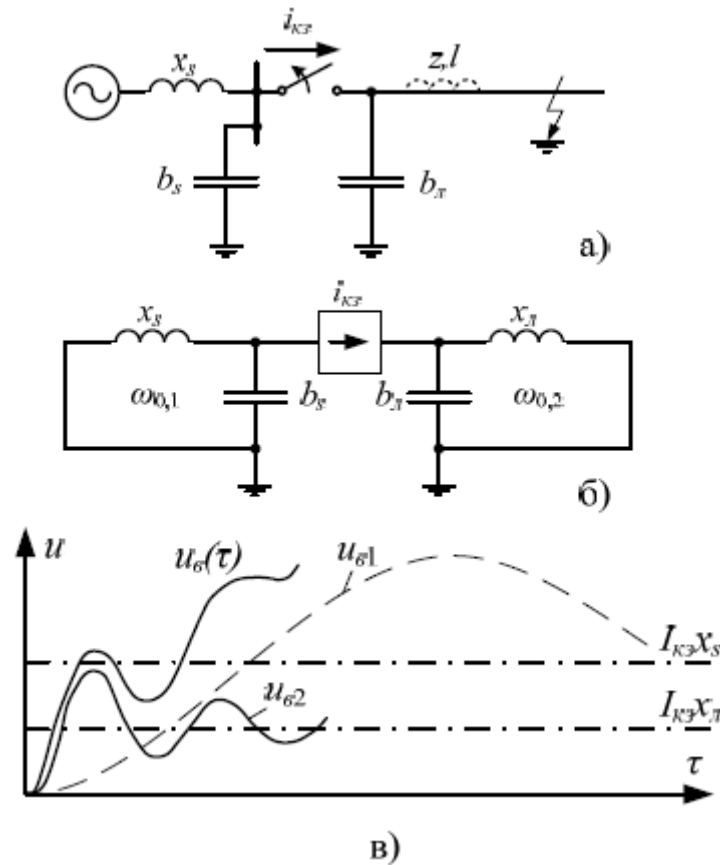


Рисунок 5.6 – Відключення невіддаленого короткого замикання,

а – початкова схема; б – розрахункова схема; в – крива  $u_B(\tau)$  та її складові

Частоти коливань рівні відповідно  $\omega_{0,1} = \frac{1}{\sqrt{x_S b_S}}$  і  $\omega_{0,2} = \frac{1}{\sqrt{x_L b_L}}$ . Внаслідок малої величини  $x_L$  і  $b_L$  частота  $\omega_{0,2} \gg \omega_{0,1}$ . Найбільш небезпечні короткі замикання за малим  $x_S$  і реактивним опором  $x_L$ , що відповідає 1-3 км лінії.

В цьому випадку струм короткого замикання  $I_{KЗ} = \frac{E}{x_S + x_L}$  практично не відрізняється від струму к.з. на шинах живильної підстанції, напруга  $I_{KЗ} * x_L$  вже достатньо висока, а частота відновлювальної напруги, з боку лінії  $\omega_{0,2}$ , ще

велика. Крива  $u_e(\tau)$  та її складові для невіддаленого короткого замикання, побудовані за формулою (5.4,а), показані на рис. 5.6,в.

Формули (5.4) і криві  $u_e(\tau)$  на рис. 5.5 і 5.6 дійсні при заміщенні ліній П-подібними схемами. У реальних, розгалужених мережах крива  $u_{e1}(\tau)$  з боку шин аперіодична з амплітудою порядку  $1,3U_\phi$ . У початковій своїй частині, приблизно до 70% амплітуди,  $u_{e1}$  наростає прямолінійно зі швидкістю (ш.в.н.)  $I_{кз}\omega z_e$ , де  $z_e$  - еквівалентний хвильовий опір ліній, підключених до шин (без врахування лінії, на якій відбулося коротке замикання). При невіддалених коротких замиканнях і врахуванні хвильових параметрів ділянки лінії до місця к.з. відновлювальна напруга з боку лінії має пилкоподібну форму і ш.в.н. з боку лінії рівна  $I_{кз}\omega z_L$ , де  $z_L$  - хвильовий опір лінії. Отже, сумарна ш.в.н. рівна  $I_{кз}\omega(z_e + z_L)$ . Враховуючи, що  $z_L \gg z_e$  завжди, то ш.в.н. при невіддаленому короткому замиканні значно перевищує нормовані значення. Тому в багатьох країнах проводять спеціальні випробування вимикачів в схемі невіддаленого короткого замикання.

## 6 Економічна частина

Комерціалізація вибору високовольтних обмежувачів перенапруг.

Маркетинговий аналіз.

### 6.1 Опис ідеї проекту

Передача енергії на постійному струмі – це вже встановлена технологія, вона використовується більше 50 років. Протягом перших 30 років це було перспективна технологія, з обмеженою кількістю проектів на рік. Зі змінами у вимогах, а також у зв'язку з розвитком екологічних потреб, лінії постійного струму стали загальним інструментом у проектуванні та розробці мереж передачі електричної енергії. Основними факторами для цього є необхідність збільшення потужності передачі електроенергії та відстаней між її виробниками та споживачами.

Нелінійні обмежувачі перенапруг стали невід'ємною складовою будь-яких електричних станцій. Набігаючі грозові перенапруги, комутаційні перенапруги мережі, короткі замикання на лінії призводять до збудження в лініях великих напруг і струмів, що можуть порушити роботу електричного обладнання підстанції і навіть вивести його з ладу. Для запобігання таким випадкам на підстанціях і використовуються нелінійні обмежувачі перенапруг, які розроблені в Японії, Швеції, Німеччині 10-20 років тому. Застосування нелінійних обмежувачів перенапруг дає змогу запобігти таким впливам або зменшити їх наслідки до мінімуму.

Табл. 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту методів визначення захисних властивостей високовольтних обмежувачів перенапруг

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди користувача</i>
обмежувачів	1.Вибір основних електричних характеристик нелінійних	Можливість вибору ОПН за його основними електричними
	2.Визначення дійсного значення витриманого статичного навантаження нелінійних обмежувачів перенапруг	Можливість вибору нелінійних обмежувачів перенапруг за його витримуваним механічними навантаженнями
перенапруг	3. Розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покришки ОПН	Перевірка обраного ОПН для

Нижче представлений зміст ідеї, що пропонується, можливі напрямки застосування, основні вигоди, що може отримати користувач товару за кожним напрямком застосування, відмінності від існуючих аналогів та замінників. Перші три пункти подаються у вигляді таблиці (табл. 6.1) і дають цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Провівши аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів, можна стверджувати наступне: методика вибору ОПН дозволяє обрати ОПН за оптимальними ціновими показниками шляхом підбору та порівняння моделей, що відповідають розрахованим характеристикам.

Проведений порівняльний аналіз показників для власної ідеї за показниками: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) заносимо до табл. 6.2.



Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї визначення захисних властивостей високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму

№ п/ п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтрал- ьна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент			
1.	Методика вибору нелінійних обмежувачі в перенапруг	Визначення основних електричних характеристи- к та дійсного значення витримуваного статичного навантаження  ОПН	Відсутні попередні розробки. Існуючі розробки в інших країнах недоступні (приховані для  одержання переваг – першості нових технологій).	Потреба в розробці нормативно ї документац- ії на державному рівні. Відсутні державні стандарти  та рекомеанда- ції з вибору високоволь- тних ОПН постійного струму	Часткове використ- ання існуючих методик для розрахун- ку електрич- них  характери- стик ОПН змінного струму	Широкий діапазон можливості застосовува- ння матеріалів для вибору ОПН постійного струму

За приведеним переліком слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару можна стверджувати про конкурентоспроможність методики вибору високовольтних обмежувачів перенапруг для ліній електропередач.

## 6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 7.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї вибору ОПН для ліній електропередач

<i>№ n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
		Технологія 1	Чи вони наявні, або ж необхідно їх розробити/доробити?	Чи вони доступні авторам проекту?
1	Методика Вибору ОПН	Технологія розрахунку основних електричних характеристик ОПН з урахуванням провідності матеріалу ізоляційної покришки ОПН	Технології наявні, але відсутня нормативна документація для їх застосування.	Технології авторам не доступні

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: реалізація можлива за початком застосування технології передачі електричної енергії на постійному струмі в Україні та розробки відповідної нормативної документації на державному або галузевому рівні.

### 6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

До таблиці 6.4 занесені результати проведеного аналізу попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.

Таблиця 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту вибору ОПН для ліній електропередач

<i>№</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	--
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Відсутність вимог до стандартизації та нормативної документації
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Потребують розробки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідома

Надалі визначені потенційні групи клієнтів та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту вибору ОПН для ліній електропередач

<i>№</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти)</i>	<i>Відмінності у поведінці потенційних груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Вибір ОПН для ліній електропередач	Електричні перетворювальні підстанції та вставки постійного струму	Відсутня єдина стандартизація та нормативна документація	Вимоги не сформовані в Україні. В Німеччині, Японії, Китаї затребуваний максимальний розвиток передачі постійного струму.

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведений аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 6.8).

Таблиця 6.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Збільшення курсу валюти	Здорожчання вартості помилки при виборі постачальника	Просування розробки унеможливилює зменшення ймовірності помилки
2	Протекційні заходи із підтримання українських виробників	Обмеження доступу іноземних компаній	Налагодження співпраці із вітчизняними виробниками

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Ймовірне долучення до стандартів МЕК	Створення мінімально необхідної нормативної бази.	Розробка компанією пропозиції із урахуванням стандартів МЕК.
2	Зростання кількості введених в експлуатацію підстанцій на постійному струмі	Потенційне збільшення попиту.	Формування бази потенційних клієнтів.

Таблиця 6.8 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін вибору ОПН для ліній електропередач

<i>№</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг вибору ОПН для ліній електропередач у порівнянні з конкурентом</i>						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Врахування основних електричних характеристик ОПН	15	X						
2.	Врахування дійсного значення витриманого статичного навантаження ОПН	10		X					
3.	Використання розрахунку провідності матеріалу ізоляційної покривки ОПН	15	X						
4.	Використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників	0					X		
5.	Розроблення нормативної документації	17						X	
6.	Загальний результат		-6	-2			+1	+2	

Аналізуючи табл. 6.8 можна зробити висновки: стартап-проект має такі основні переважаючі фактори конкурентоспроможності, як врахування основних електричних характеристик ОПН, визначення дійсного значення витриманого статичного навантаження ОПН, використання розрахунку провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН в сумі, які дають рейтинг товарів-конкурентів “-8”. Фактори конкурентоспроможності, за якими даний проект програє товарам-конкурентам, це використання матеріалів, наведених в каталогах фірм-виробників ОПН та необхідність розроблення нормативної документації, які дають рейтинг товарів-конкурентів “+3”. Сумарний рейтинг товарів-конкурентів складає “-5”.

На основі порівняльного аналізу сильних і слабких сторін методики вибору ОПН та факторів загроз і можливостей проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, який наведено у табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><u>Сильні сторони:</u> в методиці присутні матеріали для врахування основних електричних характеристик ОПН, визначення дійсного значення статичного навантаження. Особливістю вибору ОПН є розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покриття ОПН.</p>	<p><u>Слабкі сторони:</u> відсутність нормативної документації на державному рівні. Необхідне створення нормативно-правової бази на загальнодержавному рівні.</p>
<p><u>Можливості:</u> на основі розробленої методики вибору ОПН для ліній електропередач на початкових етапах можливе розроблення нормативної бази для ліній постійного струму на основі стандартів МЕК та зростання попиту на послуги оцінювання ОПН.</p>	<p><u>Загрози:</u> нестабільність економіки та залежність вартості ОПН від курсу іноземної валюти. Зростання цінового фактора для споживачів у зв'язку із зростанням ціни на ОПН. Обмеження ринку постачальників вітчизняними компаніями.</p>

## 7 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

### 7.1 Задачі розділу

Проведення робіт під напругою в мережах високої та НВН стало можливим завдяки створенню захисних екранувальних комплектів, які дали можливість людині перебувати тривалий час у сильному електромагнітному полі, розробці спеціальних технологій робіт, які забезпечили безпечний вихід людини безпосередньо на провід ПЛ, що знаходиться під напругою, а також завдяки науковим досягненням учених, спеціалістів і робочих Вінничаенерго, Донбасенерго, Київенерго, Львівенерго та інших енергооб'єднань України.

Сформулюємо основні задачі щодо охорони праці пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою:

1. Провести аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою.
2. Розробити організаційно-технічні рішення з охорони праці під час виконання робіт під напругою.
3. Провести розрахунок напруженості електричного поля.

### 7.2 Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою

Початкові данні для виконання робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі використовуємо з попередніх розділів та підрозділів магістерської кваліфікаційної роботи:

На електротехнічний персонал при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою за ГОСТ 12.0.003-74 такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні:

- підвищена та знижена температура повітря робочої зони;
- підвищена та знижена рухомість повітря;

- рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена та знижена вологість повітря у робочій зоні;
- недостатність природного освітлення;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- небезпечний рівень напруги в електричному колі, замикання якого може відбутись через тіло людини;
- підвищений рівень вібрації;
- підвищений рівень електромагнітних випромінювань;
- в) психофізіологічні:
  - фізичні перевантаження (динамічні)
  - нервово-психічні перевантаження (монотонність праці, перенапруга аналізаторів).

### 7.3 Організаційно-технічні рішення з охорони праці під час виконання робіт під напругою

Незалежно від виду робіт під напругою, в них можна виділити ряд однотипних операцій: підготовчі роботи, доставка електрика на потенціал проводу, виконання і завершення роботи.

Підготовчі роботи включають в себе визначення кліматичних умов на місці проведення робіт, підготовку робочої площадки, перевірку справності інструментів та пристосувань, монтаж на опорі оснащення, перевірку ізоляції системи, що використовується, та окремих елементів, підготовка електрика до виходу на потенціал проводу.

Кліматичні умови визначаються шляхом вимірювання температури, відносної вологості та швидкості руху повітря. Ці показники не повинні виходити за межі установлених норм:

- температура повітря від мінус 10 °С до плюс 40 °С;



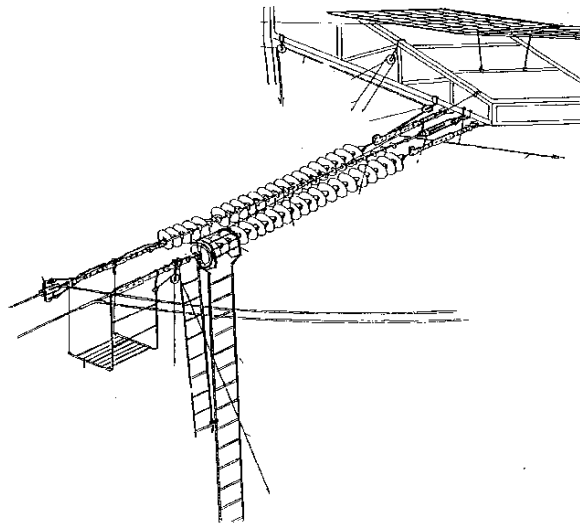
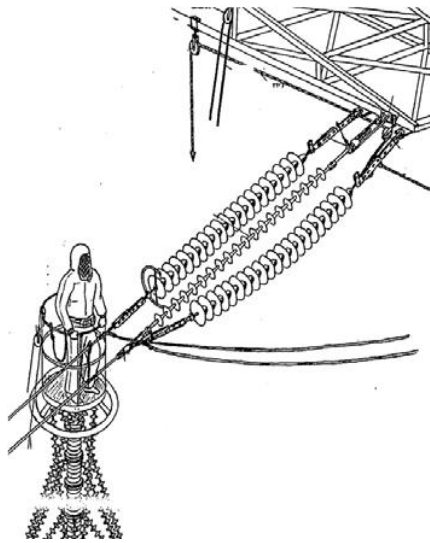
- швидкість вітру не більше 10 м/с;
- відносна вологість не більше 90 %, забороняється проведення робіт при опадах у вигляді дощу та снігу, тумані та інеї, зледенінні на опорах і проводах, наближенні грози.

Підготовка робочої площадки полягає в розчищенні місця, де розстиляють брезент, на який в певному порядку розкладають приладдя і інструмент. Ретельно перевіряють їх цілісність і відсутність дефектів, терміни випробування і придатність ізолювальних засобів. Перевіряють і надягають екрануючі комплекти одягу, вимірявши їх опір постійному струму. Надягають захисні каски і запобіжні пояси. Відповідно до технологічної карти здійснюють монтаж приладь на опорі, подача всіх приладь і інструментів забезпечується за допомогою безконечного ізолювального канату.

За безпекою виконання всіх цих операцій стежить керівник робіт. Особлива увага приділяється забезпеченню ізоляційних відстаней. Безконечний канат не повинен наближатися на недопустимі відстані до струмоведучих частин. Забороняється скидати з опори будь-які предмети. Всі операції здійснюються лише за командою керівника і виконавця робіт. Для цих цілей керівник використовує бінокль і мегафон. В процесі робіт здійснюється постійний нагляд за всіма членами бригади. Керівник робіт не може безпосередньо брати участь в роботах і повинен знаходитися внизу під опорою, а виконавець може знаходитися на опорі.

Однією з відповідальних операцій при робіт на ВЛ НВН є піднімання на опорі, до потенціалу проводу та переміщення по траверсі, оскільки роботи проводяться на значній висоті, що потребує виконання правил охорони праці при роботі на висоті.

З метою безпечної доставки електромонтера на потенціал проводу, впроваджені наступні основні способи: за допомогою телескопічної вишки (рис. 7.1а), ізолювальної драбини (рис. 7.1б), підвісної кабіни (7.2а) та поворотної консолі (рис. 7.2б).

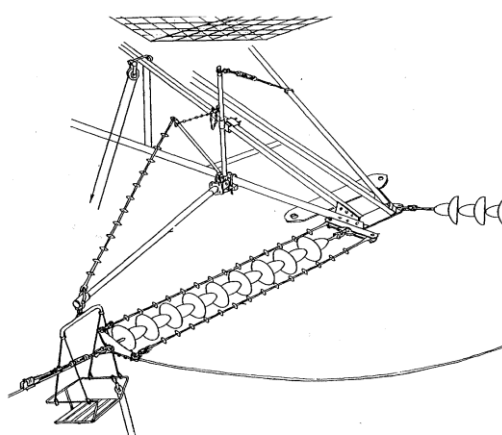
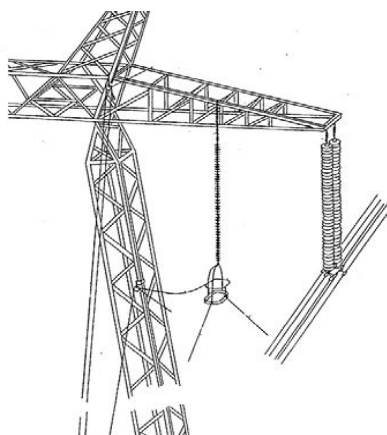


а)

б)

Рисунок 7.1 – Схеми доставляння електромонтера до струмопровідних частин ПЛ із використанням телескопічної вишки (а) та за допомогою ізолювальної драбини (б)

Найбільш зручним способом підйому є використання вишок з ізолювальною вставкою. Проте, при проходженні електроліній по сільськогосподарських угіддях і по пересіченій місцевості, використання вишок не завжди зручно, тому для підйому електромонтера як на траверсу опори або порталу, так і до проводів, більше застосування знайшли засоби малої механізації і приладдя



а)

б)

Рисунок 7.2 – Схеми доставки електромонтера до струмопровідних частин ПЛ у підвісному монтерському сидінні способом «маятника» (а) та за допомогою поворотної консолі (б)

Для підйому на залізобетонні циліндрові опори і кінчні опори ліній електропередачі застосовують спеціальні монтерські лази. Принцип їх дії оснований на затисканні стояка опори між тросовою петлею і шипом упорів під «дією сили тяжіння монтера». Зручніше користуватися інвентарними переносними драбинами, які кріпляться до ствола опори. Драбина має сходи з дюралюмінієвих труб, які складаються з однієї нижньої і шести проміжних секцій, кожна завдовжки по 2 метри. Для підйому на висоту більше 14 м використовують секції від іншої драбини. На металеві опори повітряної лінії електромонтери можуть підніматися по стоп-болтах, які встановлені на поясних кутах. В цьому випадку особливу увагу слід звертати на жорсткість кріплення кожного стоп-болта.

Особливу увагу при виконанні робіт слід приділяти страхуванню людини при підйомі на опору і переміщенні по ній. Найбільш поширеним способом страхування є використання поясу з одним або двома капроновими фалами. Крім того, можна використовувати способи страхування із застосуванням вертикальних і горизонтальних канатів для страхування.

В будь-якому випадку слід уникати зайвого наближення людини до проводів повітряної лінії, які знаходяться під напругою. При перевірці вживаних приладь робочою напругою необхідно щоб електромонтери, які знаходяться на опорі, при випробуванні переміщалися до стояка, а електромонтери, що знаходяться на поверхні

землі, відійшли від опори на 8–10 м, або використовували діелектричні боти. При появі розрядів на поверхні ізолюючих пристосувань, пари, диму, роботи мають бути негайно припинені.

Забороняється знаходження членів бригади під вантажем, що піднімається, і приладдям, змонтованим на траверсі і проводах. Під час роботи з поліпропіленовими канатами не можна допускати їх забруднення і тертя об металеві частини, нижні кінці канатів повинні знаходитися в пластмасових бочках, на чистому брезенті або притримуватися руками. Забороняється передавати або отримувати інструмент або приладдя працівникам, що не знаходяться на тій же робочій площадці.

Підприємства, які займаються обслуговуванням лінії електропередачі напругою 330 кВ і вище, а також іншого устаткування надвисокої напруги, мають ряд специфічних особливостей. До них можна віднести такі:

- велика протяжність ліній електропередачі;
- відносно мала чисельність персоналу;
- підприємство має вузлову структуру, в якій вузлами є підстанції, а з'єднувальними елементами – ПЛ 330 кВ і вище;
- високовольтне устаткування і персонал, що обслуговує його, в основному, знаходяться на підстанціях;
- роботи ведуться головним чином в умовах відкритої виробничої площадки, що накладає певні обмеження при обслуговуванні устаткування в зимовий період.

Роботи із технічного обслуговування ПЛ виконуються електромонтерами із ремонту повітряних ліній електропередачі, за винятком вибіркового оглядів і оглядів ВЛ після капітального ремонту, які виконуються інженерно-технічними працівниками.

#### 7.4 Розрахунок напруженості електричного поля

Визначити напруженість електричного поля ЛЕП 750 кВ і розподіл напруженості в точці максимального провисання проводу між опорами, по заданим даним про ЛЕП, які наводяться нижче.

$$h = 1,8\text{м}; d = 19\text{м}; x = -50\dots 50\text{м}; r = 0,21\text{м}; H_0 = 25\text{м}; u = 750/\sqrt{3}$$

де:  $h$  - середня висота людини;

$d$  - відстань між проводами ;

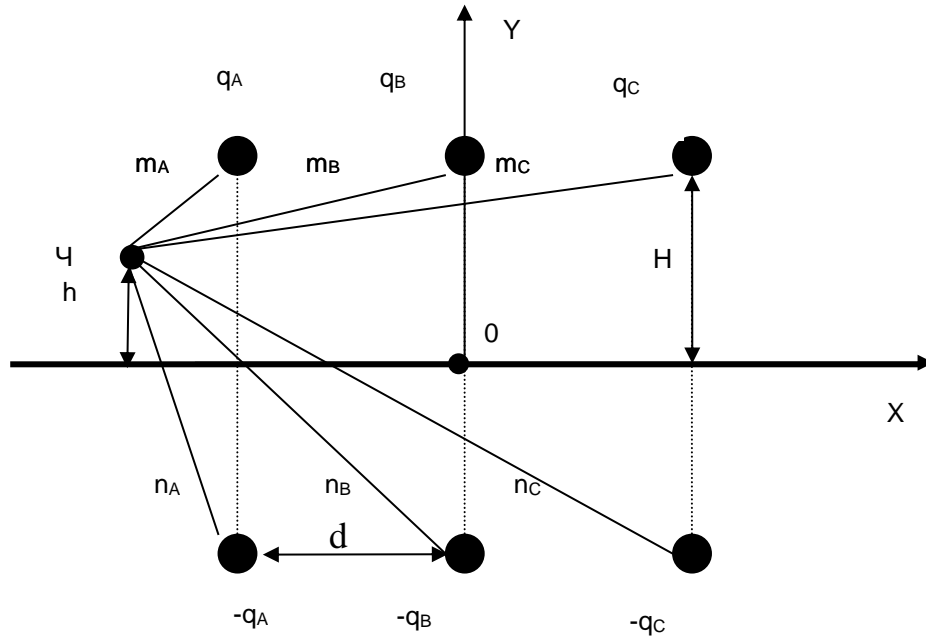
$x$  - діапазон змінення відстаней на якій буде знаходитись людина ;

$r$  - радіус розщепленого проводу ;

$H_0$  - відстань від проводу до землі в точці кріплення проводу ;

$u$  - фазна напруга лінії ;

$l$  - габарит лінії .



### Розрахунок

Знайдемо довжину відрізків  $m$  і  $n$ :

$m$  - найкоротша відстань від заданої точки до проводу відповідної фази;

$n$  - найкоротша відстань від заданої точки до дзеркального зображення проводу відповідної фази.

$$m_A = \sqrt{(x+d)^2 + (1-h)^2}; \quad n_A = \sqrt{(x+d)^2 + (1+h)^2};$$

$$m_B = \sqrt{x^2 + (1-h)^2}; \quad n_B = \sqrt{x^2 + (1+h)^2};$$

$$m_C = \sqrt{(x-d)^2 + (1-h)^2}; \quad n_C = \sqrt{(x-d)^2 + (1+h)^2}.$$

Висота провисання проводу посередині прогону:

$$H_{cp} = \frac{H_0 + 2 \cdot 1}{3}.$$

Знаходимо ємність фази відносно землі на одиницю довжини:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{2H_{cp}d}{r \sqrt[3]{(4H_{cp}^2 + d^2)} \sqrt{H_{cp}^2 + d^2}}}$$

Знаходимо розрахункові коефіцієнти:

$$k = \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0};$$

$$k1 = \left( \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right); \quad k2 = \left( \frac{1-h}{m_A^2} + \frac{1+h}{n_A^2} \right);$$

$$k3 = \left( \frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2} \right); \quad k4 = \left( \frac{1-h}{m_B^2} + \frac{1+h}{n_B^2} \right);$$

$$k5 = \left( \frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2} \right); \quad k6 = \left( \frac{1-h}{m_C^2} + \frac{1+h}{n_C^2} \right).$$

Результуюча напруженість ЕП в точці «Ч» ПЛЕП:

$$E = \frac{1}{2} c \cdot u \cdot k \cdot \sqrt{(2 \cdot k1 - k3 - k5)^2 + 3(k3 - k5)^2 + (2 \cdot k2 - k4 - k6)^2 + 3 \cdot (k4 - k6)^2}$$

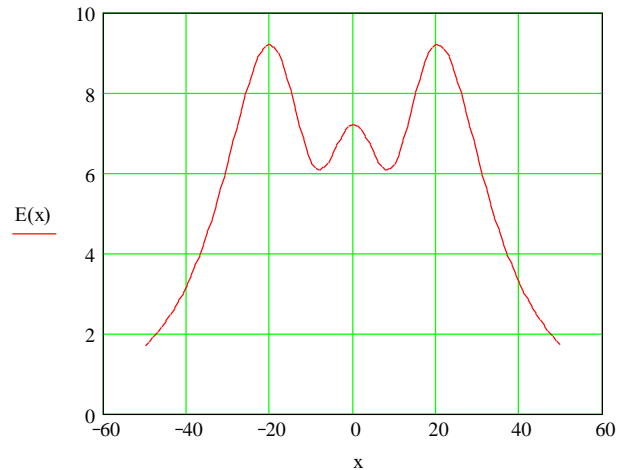
Змінюємо координату x в інтервалі від -50 до 50 метрів та повторюємо розрахунок.

Данні розрахунку наведені в додатку Б.

За одержаними даними будуємо криву розподілу напруженості електричного поля вздовж осі x.

x,м	-50	-49	-48	-47	-46	...	46	47	48	49	50
E,кВ/м	1,89	2,04	2,20	2,39	2,59	...	2,59	2,39	2,20	2,04	1,89

Крива розподілу напруженості електричного поля



Висновок: у даному розділі ми розглянули основні положення щодо реалізації конституційного права зайнятих працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні умови праці. Розрахували напруженість електричного поля ЛЕП 750 кВ і розподіл напруженості в точці максимального провисання проводу між опорами, по заданим даним ЛЕП.

## ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи, було досліджено ефективність засобів обмеження перенапруг.

Обмежувач перенапруг може використовуватися в якості основного або додаткового засобу зниження числа грозових відключень ПЛ. Обмежувач перенапруг може розміщуватися:

- на опорах з підвищеним опором заземлення;
- на високих опорах з підвищеною індуктивністю;
- на часто вражаються блискавкою опорах або ділянках траси ПЛ;
- на ділянках траси ПЛ, які не мають встановленого троса;
- на будь-яких ПЛ, грозостійкість яких не задовольняє споживача.

Обмежувач перенапруг надійно захищає ізоляцію на відстані не більше 200-300 метрів від місця своєї установки, а значить необхідне число Обмежувачів перенапруг можна порівняти з необхідним числом захисту опор.

- для ПЛ без тросу установка одного обмежувача перенапруг на кожній опорі (в верхню фазу) призводить до зниження числа грозових відключень;
- для ПЛ з тросом установка на 1-2 фази обмежувача перенапруг на кожній опорі (в нижні фази) не дає зниження числа грозових відключень і, тому, для ліній з тросом необхідне встановлення обмежувача перенапруг одночасно на усі фази кожної опори.

Вольтамперна характеристика обмежувача перенапруг в рамках заданого класу напруги мало впливає на ефективність роботи обмежувача перенапруг.

Для одноланцюгових ПЛ без тросу установка обмежувача перенапруг на опорі рекомендується:

- в одну верхню фазу при трикутному розташуванні проводів;
- в усі три фази при горизонтальному розташуванні проводів.

Для одноланцюгових ПЛ з тросом установка обмежувача перенапруг на опорі рекомендується:

- в усі три фази при трикутному розташуванні проводів;
- в дві крайні фази при горизонтальному розташуванні проводів.



Для багатоланцюгових ПЛ установка обмежувача перенапруг на опорі, рекомендується тільки в фазі однієї з двох ланцюгів.

Обмежувач перенапруг повинен приєднуватися до опори ПЛ 6-750 кВ без будь-яких іскрових проміжків через спеціальний пристрій універсальний відділювач. У мережах з глухозаземленою нейтраллю приєднання обмежувача перенапруг допустимо за допомогою звичайного «відділювача».

Розглянуто аналітичні методи для дослідження внутрішніх перенапруг, метод симетричних складових для розрахунку перенапруг. Також детально розглянуто схеми заміщення електропередач, дослідили підвищення напруги на здорових фазах при однофазних замиканнях, та показано основні складові внутрішніх перенапруг та їх коефіцієнти.

Також проведено експериментальне дослідження внутрішніх перенапруг в діючих мережах. Ознайомились з інформаційно-діагностичним комплексом для вимірювання внутрішніх перенапруг «Регіна», та з комутаційними перенапругами в електричних системах. Розглянуто випадки з перенапругою:

- при включенні лінії;
- при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями;
- при повторному включенні лінії;

Розглянуто випадок відновлювальних напруг при відключенні коротких замикань.

Детально розглянуті перенапруги при замиканні на землю. Розглянуто випадок нестійкого горіння заземлювальної дуги, перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю та замиканні на землю і обриву проводу, а також перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасильною котушкою.

Також описані основні положення охорони праці з роботи людини на ПЛЕП, та розраховано напруженість електричного поля ЛЕП.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. Учебник для вузов / Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. ; под ред. В. П. Ларионова. / – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
2. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ / [Гиндуллин Ф. А., Гольдштейн В. Г., Дульзон А. А., Халилов Ф. Х.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
3. Зархи И. М. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ / Зархи И. М., Мешков В. Н., Халилов Ф. Х. – Л. : Наука, 1986.– 128 с.
4. Стационарные и квазистационарные перенапряжения в электрических сетях высокого напряжения / [Костенко М. В., Богатенков И. М., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х.]. - К. : ВИНТИ, 1986. Т. 14. – 97 с. - (Итоги науки и техники. Сер. Электрические станции и сети.)
5. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. / [Костенко М. В., Кадомская К. П., Левинштейн М. Л., Ефремов И. А.]. – Л. : Наука, 1988. – 302 с.
6. Степанчук К. Ф. Техника высоких напряжений / Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А. – Минск : Вышэйша школа, 1982. – 367 с.
7. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения. / [Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В.] ; пер. с нем.; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
8. Бржезицкий В. А. Исследования перенапряжений в сетях 6 – 35 кВ Киевэнерго и разработка методических рекомендаций по выбору и применению ограничителей перенапряжений / НТУУ «КПИ»; руков. В. А. Бржезицкий, исполнит. О. С. Ильенко, С. А. Соколовский. – Киев, 1999 – 60 с. (Отчет о НИР (заключительный))
9. Методичні вказівки з вибору обмежувачів перенапруг нелінійних виробництва підприємства „Таврида Електрик” для електричних мереж 6-35 кВ / [Бржезицький В. О., Беляєв В. К., Ильенко О. С., Соколовський С. А.]. - Київ, 2001. – 40 с.
10. Удод Евгений Иванович. Ремонт электроустановок под напряжением / Е.

И. Удод. – К. : Техніка, 1986. – 163 с.

11. Кульматицкий О. И. Безопасность линий электропередачи / О. И. Кульматицкий, В. М. Кутин. – К. : Техника, 1991. – 112 с.

12. Технологические карты производства работ под напряжением на ВЛ 220–750 кВ / [Е. И. Удод, О. И. Кульматицкий, В. Л. Таловерья, А. М. Хвостик] ; под ред. Е. И. Удод. – К. : Техника, 1988. – 200 с.

## ДОДАТКИ

Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
завідувач кафедри ЕСС  
д.т.н., професор Лежнюк П. Д.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
на здобуття ступеня «магістра»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ ЗАХИСТУ  
ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ВІД ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ**

08-13.МКР.015.00.108 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу ОППП магістр,  
групи ЕСМ-18м  
галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
спеціальності 141 – «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
освітня програма «Електричні системи і  
мережі»  
Ткаченко А.Е. \_\_\_\_\_

Керівник: к.т.н., доцент каф. ЕСС  
Собчук Н. В. \_\_\_\_\_  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Рецензент: \_\_\_\_\_  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

Вінниця – 2020 року

## ДОДАТОК А

### Технічне завдання МКР

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки  
Кафедра електричних станцій і систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Лежнюк П.Д.

(наук. ст., вч. зв., ініц. та

прізви.)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

### ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ДЛЯ  
ЗАХИСТУ ІЗОЛЯЦІЇ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ВІД ГРОЗОВИХ ПЕРЕНАПРУГ  
08-13.МКР.015.00.006 ТЗ

Науковий керівник: к.т.н., доц., каф.  
ЕСС

\_\_\_\_\_ Собчук Н.В.

(підпис)

Магістр групи ЕСМ-18м

\_\_\_\_\_ Ткаченко А.Е.

(підпис)

Вінниця 2020 р.

## **1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)**

а) для забезпечення необхідного рівня грозостійкості ПЛ використовують поєднання традиційних засобів блискавкозахисту: установку одного або декількох блискавкозахисних тросів, зниження опору заземлення опор, посилення ізоляції. Через високі значення опору заземлення опор ПЛ, високий питомий опір ґрунту, неможливість застосування блискавкозахисних тросів, високі вітро-ожеледні навантаження традиційні засоби грозозахисту не забезпечують необхідну грозостійкість ПЛ. Тому ефективним способом підвищення грозостійкості є установка на опорах ПЛ «підвісних» ОПН.;

б) наказ ректора ВНТУ № 76 від 06 березня 2020 р. про затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи.

## **2. Мета і призначення МКР**

а) мета розробка принципів побудови системи обмеження перенапруг, пропозиція заходів для обмеження перенапруг, аналіз їх реалізації в електропередачі України, перспективи глибшого обмеження перенапруг.;

б) призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

## **3. Вихідні дані для виконання МКР**

Визначити число відключень ПЛ, пов'язаних з грозовими перенапругами до встановлення обмежувачів перенапруг і після встановлення обмежувачів перенапруг, враховуючи, що довжина лінії  $L = 100$  км, число грозових годин,  $T_{\text{г}} = 100$  год, імовірність перекриття ізоляції ПЛ  $P_{\text{ф}} = 1$ , питома кількість розрядів блискавки в ПЛ  $n = 100$ . Оцінити доцільність установки на кожній опорі певної кількості обмежувачів перенапруг для опорів заземлення:  $R_3 = 10$ ,  $R_3 = 30$ ,  $R_3 = 100$  Ом

Використовуючи програму аналізу інформаційно-діагностичного комплексу „Регіна” визначити запис АПВ фази „А” лінії 750 кВ „ПС-750 Вінницька (РП330)”– „Козятин-330”.

Користуючись параметрами лінії електричних передач приведеними на рис.1 визначити довжину лінії враховуючи, що питомий реактивний опір лінії, для ЛЕП 330 кВ складає в середньому  $x_0 \approx 0,32 \text{ Ом/км}$ .

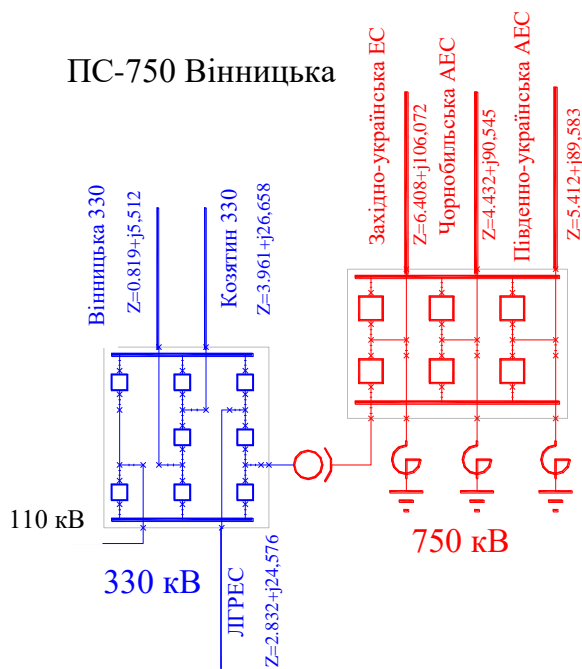


Рисунок 1 – Схема підстанції „Вінницька 750”

1. Визначити електричну довжину лінії.
2. В залежності від довжини лінії побудувати її схему заміщення, та провести розрахунок параметрів схеми заміщення для Т- подібної і для П- подібної схеми:
3. Визначити частоту власних коливань контуру враховуючи реактивний опір мережі  $x_S = 0,5$  та користуючись виразом:
4. Використовуючи залежності приведені на рис.Б.2 визначити півхвилю максимуму перенапруги та ударний коефіцієнт  $k_{ydn}$  (n – номер півхвилі), який їй відповідає.



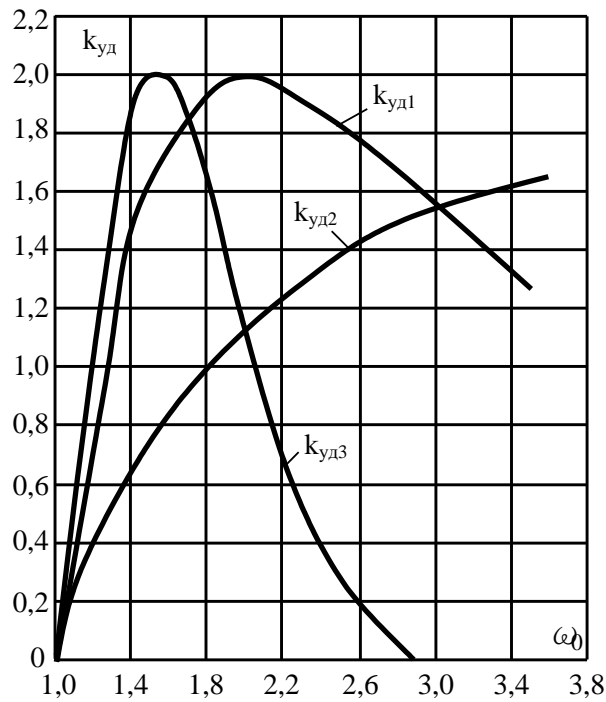


Рисунок 2 – Залежність ударних коефіцієнтів, що відповідають першим трьом максимумам напруги, від частоти власних коливань при  $\delta = 0$ .

Використовуючи вираз  $\delta = r/2x$  та параметри лінії у абсолютних одиницях визначити коефіцієнт згасання контуру;

Визначити ударний коефіцієнт комутаційної перенапруги з врахуванням втрат (коефіцієнту згасання). Припускаючи, що комутація проходить в момент близький до максимуму напруги між контактами побудувати залежність напруги на ємності від часу

#### 4. Технічні вимоги до виконання МКР

- метод симетричних складових для розрахунку перенапруг;

#### 5. Економічні показники

Комерціалізація вибору високовольтних обмежувачів перенапруг.

Маркетинговий аналіз.

#### 6. Етапи МКР та очікувані результати

№ етапу	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Розроблення технічного завдання	03.03.19	06.03.19	формування технічного завдання
2	Перенапруги та їх дослідження	07.03.20	16.03.20	аналітичний огляд літературних джерел, задачі досліджень, розділ 1 ПЗ
3	Застосування обмежувачів для захисту ізоляції ПЛ	17.04.20	25.04.20	розділ 2
4	Аналітичні методи дослідження перенапруг	26.04.20	13.05.20	розділ 3
5	Дослідження перенапруг в діючих мережах	14.05.20	16.05.20	розділ 4
6	Комутаційні перенапруги в електричних системах	17.05.20	22.05.20	розділ 5
7	Перенапруги при замиканнях на землю	21.05.20	24.05.20	розділ 6
8	Оформлення пояснювальної записки	25.05.20	30.05.20	пояснювальна записка
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	01.06.20	03.06.20	плакати, презентація

#### 7. Матеріали, що подаються до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, відгук опонента, протоколи складання державних іспитів, анотації до МКР українською та

іноземною мовами, довідка про відповідність оформлення МКР діючим вимогам.

#### **8. Порядок контролю виконання та захисту МКР**

Виконання етапів розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії, затвердженою наказом ректора.

#### **9. Вимоги до оформлення МКР**

Вимоги викладені в «Положенні про кваліфікаційну роботу у Вінницькому національному технічному університеті (БДР (БД), ДП (ДР), МКР)», 2015р.

#### **10. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом**

Відсутні.

## Додаток Б Розрахунок числа грозивих вимкнень одноланцюгової ПЛ

### Оцінка числа грозивих вимкнень одноланцюгової ПЛ без тросу

$$\begin{aligned} Df &:= 0.5 & Dt &:= 0 \\ Pf &:= 1 & n &:= 100 \\ Do &:= 0.5 & Pt &:= 0 \\ & & L_{\text{ПЛ}} &:= 100 \\ Po1 &:= 0.0114 & T_{\text{ч}} &:= 100 \end{aligned}$$

$$N_{\text{ПЛ}1} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po1 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 50.57$$

$$Po5 := 0.0306$$

$$N_{\text{ПЛ}5} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po5 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 51.53$$

$$Po10 := 0.0696$$

$$N_{\text{ПЛ}10} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po10 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 53.48$$

$$Po15 := 0.1764$$

$$N_{\text{ПЛ}15} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po15 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 58.82$$

$$Po20 := 0.2670$$

$$N_{\text{ПЛ}20} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po20 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 63.35$$

$$Po30 := 0.4172$$

$$N_{\text{ПЛ}30} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po30 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 70.86$$

$$Po50 := 0.6466$$

$$N_{\text{ПЛ}50} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po50 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 82.33$$

$$Po70 := 0.7746$$

$$N_{\text{ПЛ}70} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po70 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 88.73$$

$$Po100 := 0.8574$$

$$N_{\text{гнн100}} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po100 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 92.87$$

$$Po200 := 0.9604$$

$$N_{\text{гнн200}} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po200 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 98.02$$

$$Po500 := 0.9952$$

$$N_{\text{гнн500}} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po500 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 99.76$$

$$Po1000 := 0.9992$$

$$N_{\text{гнн1000}} := (Df \cdot Pf + Do \cdot Po1000 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 99.96$$

### Оцінка числа грозівих вимкнень одноланцюгової ПЛ з тросом

$$Df := 0.005$$

$$Dt := 0$$

$$Pf := 1$$

$$n := 100$$

$$Pt := 0$$

$$L_{\text{гнн}} := 100$$

$$T_{\text{ч}} := 100$$

$$D1 := 0.0024$$

$$N_{\text{гнн1}} := (Df \cdot Pf + D1) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0.74$$

$$D5 := 0.0049$$

$$N_{\text{гнн5}} := (Df \cdot Pf + D5) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0.99$$

+

$$D10 := 0.0113$$

$$N_{\text{гнн10}} := (Df \cdot Pf + D10) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 1.63$$

$$D15 := 0.0255$$

$$N_{\text{гнн15}} := (Df \cdot Pf + D15) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 3.05$$

$$D20 := 0.0543$$

$$N_{\text{гнн20}} := (Df \cdot Pf + D20) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{гнн}}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 5.93$$

## Оцінка ефективності розміщення ОПН на кожній опорі ПЛ без тросу

$$\begin{aligned} Df &:= 0.5 & Dt &:= 0 \\ Do &:= 0.5 & n &:= 100 \\ Pt &:= 0 \\ Tч &:= 100 & L_{\text{ПЛ}} &:= 100 \end{aligned}$$

$$Po1 := 0.0696 \quad R3 := 10 \quad Pf1 := 1$$

$$N_{\text{пл1}} := (Df \cdot Pf1 + Do \cdot Po1 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 53.48$$

$$Po10C := 0.0305 \quad \underline{R3} := 10 \quad Pf2 := 0$$

$$N_{\text{пл10C}} := (Df \cdot Pf2 + Do \cdot Po10C + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 1.525$$

$$Po10CA := 0.0128 \quad R3 := 10 \quad Pf3 := 0$$

$$N_{\text{пл10CA}} := (Df \cdot Pf3 + Do \cdot Po10CA + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 0.64$$

$$Po10CAB := 0 \quad \underline{R3} := 10 \quad Pf4 := 0$$

$$N_{\text{пл10CAB}} := (Df \cdot Pf4 + Do \cdot Po10CAB + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 0$$

$$Po130 := 0.4172 \quad \underline{R3} := 30 \quad \underline{Pf1} := 1$$

$$N_{\text{пл130}} := (Df \cdot Pf1 + Do \cdot Po130 + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 70.86$$

$$Po30C := 0.2178 \quad \underline{R3} := 30 \quad Pf2 := 0$$

$$N_{\text{пл30C}} := (Df \cdot Pf2 + Do \cdot Po30C + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 10.89$$

$$Po30CA := 0.1156 \quad R3 := 30 \quad Pf3 := 0$$

$$N_{\text{пл30CA}} := (Df \cdot Pf3 + Do \cdot Po30CA + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 5.78$$

$$Po30CAB := 0 \quad \underline{R3} := 30 \quad \underline{Pf4} := 0$$

$$N_{\text{пл30CAB}} := (Df \cdot Pf4 + Do \cdot Po30CAB + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{100} \cdot \frac{Tч}{100} = 0$$

$$Po_{100} := 0.8574 \quad R_3 := 10 \quad Pf_1 := 1$$

$$N_{nn100} := (Df \cdot Pf_1 + Do \cdot Po_{100} + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 92.87$$

$$Po_{100C} := 0.5962 \quad R_3 := 10 \quad Pf_2 := 0$$

$$N_{nn100C} := (Df \cdot Pf_2 + Do \cdot Po_{100C} + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 29.81$$

$$Po_{100CA} := 0.3988 \quad R_3 := 10 \quad Pf_3 := 0$$

$$N_{nn100CA} := (Df \cdot Pf_3 + Do \cdot Po_{100CA} + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 19.94$$

$$Po_{100CAB} := 0 \quad R_3 := 10 \quad Pf_4 := 0$$

$$N_{nn100CAB} := (Df \cdot Pf_4 + Do \cdot Po_{100CAB} + Dt \cdot Pt) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0$$

Оцінка ефективності розміщення ОПН на кожній опорі ПЛ з тросом

$$\begin{aligned} Df &:= 0.005 & Dt &:= 0 \\ T_{\text{ч}} &:= 100 & n &:= 100 \\ & & Pt &:= 0 \\ & & L_{nn} &:= 100 \end{aligned}$$

+

$$Pf := 1$$

$$D_{10N} := 0.0113 \quad R_3 := 10$$

$$N_{nn10N} := (Df \cdot Pf + D_{10N}) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 1.63$$

$$D_{10B} := 0.0050 \quad R_3 := 10 \quad Pf := 0$$

$$N_{nn10B} := (Df \cdot Pf + D_{10B}) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0.5$$

$$D_{10BA} := 0.0016 \quad R_3 := 10 \quad Pf := 0$$

$$N_{nn10BA} := (Df \cdot Pf + D_{10BA}) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0.16$$

$$D_{10BAC} := 0 \quad R_3 := 10 \quad Pf := 0$$

$$N_{nn10BAC} := (Df \cdot Pf + D_{10BAC}) \cdot n \cdot \frac{L_{nn}}{100} \cdot \frac{T_{\text{ч}}}{100} = 0$$

$$D30N := 0.1077 \quad R3 := 30 \quad \underline{\underline{Pf}} := 1$$

$$N_{rrr30N} := (Df \cdot Pf + D30N) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 11.27$$

$$D30B := 0.0664 \quad R3 := 30 \quad \underline{\underline{Pf}} := 0$$

$$N_{rrr30B} := (Df \cdot Pf + D30B) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 6.64$$

$$D30BA := 0.0282 \quad \underline{\underline{R3}} := 30 \quad Pf := 0$$

$$N_{rrr30BA} := (Df \cdot Pf + D30BA) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 2.82$$

$$D30BAC := 0 \quad \underline{\underline{R3}} := 30 \quad \underline{\underline{Pf}} := 0$$

$$N_{rrr30BAC} := (Df \cdot Pf + D30BAC) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 0$$

$$D100N := 0.4003 \quad R3 := 100 \quad \underline{\underline{Pf}} := 1$$

$$N_{rrr100N} := (Df \cdot Pf + D100N) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 40.53$$

$$D100B := 0.2910 \quad R3 := 100 \quad \underline{\underline{Pf}} := 0$$

$$N_{rrr100B} := (Df \cdot Pf + D100B) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 29.1$$

$$D100BA := 0.1662 \quad \underline{\underline{R3}} := 100 \quad Pf := 0$$

$$N_{rrr100BA} := (Df \cdot Pf + D100BA) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 16.62$$

$$D100BAC := 0 \quad \underline{\underline{R3}} := 100 \quad \underline{\underline{Pf}} := 0$$

$$N_{rrr100BAC} := (Df \cdot Pf + D100BAC) \cdot n \cdot \frac{L_{rrr}}{100} \cdot \frac{T_{\psi}}{100} = 0$$



## Додаток В Розрахунок в Інформаційно-діагностичному комплексі „Регіна”

Використовуючи програму аналізу інформаційно-діагностичного комплексу „Регіна” визначити запис АПВ фази „А” лінії 750 кВ „ПС-750 Вінницька (РП330)”– „Козятин-330”.

Розрахувати:

5. Користуючись параметрами лінії електричних передач приведеними на рис Б.1.1 визначити довжину лінії враховуючи, що питомий реактивний опір лінії, для ЛЕП 330 кВ складає в середньому  $x_0 \approx 0,32 \text{ Ом/км}$  за виразом:

$$l = \frac{X_l}{x_0}$$

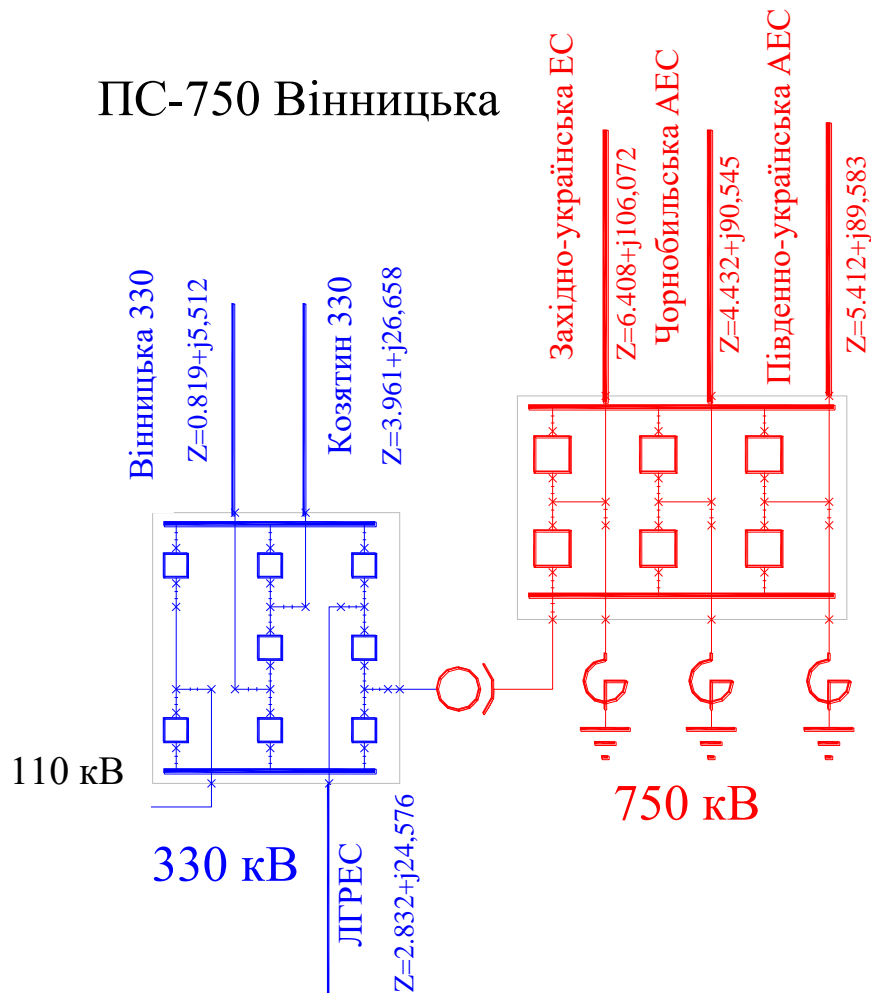


Рисунок В.1 – Схема підстанції „Вінницька 750”

6. Визначити електричну довжину лінії користуючись виразом:

$$\lambda = \pi \cdot \frac{l}{3000}$$

7. В залежності від довжини лінії побудувати її схему заміщення, та провести розрахунок параметрів схеми заміщення (у відносних одиницях  $z=1$ ) за виразами:  
для Т- подібної схеми:

$$x_l = z \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \qquad b_l = \frac{1}{z} \cdot \operatorname{tg} \lambda$$

для П- подібної схеми:

$$x_l = z \cdot \sin \lambda \qquad b_l = \frac{1}{z} \cdot \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}$$

8. Визначити частоту власних коливань контуру враховуючи реактивний опір мережі  $x_s=0,5$  та користуючись виразом:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{x \cdot b}}$$

9. Використовуючи залежності приведені на рис.Б.2 визначити півхвилю максимуму перенапруги та ударний коефіцієнт  $k_{y\partial n}$  (n – номер півхвилі), який їй відповідає.

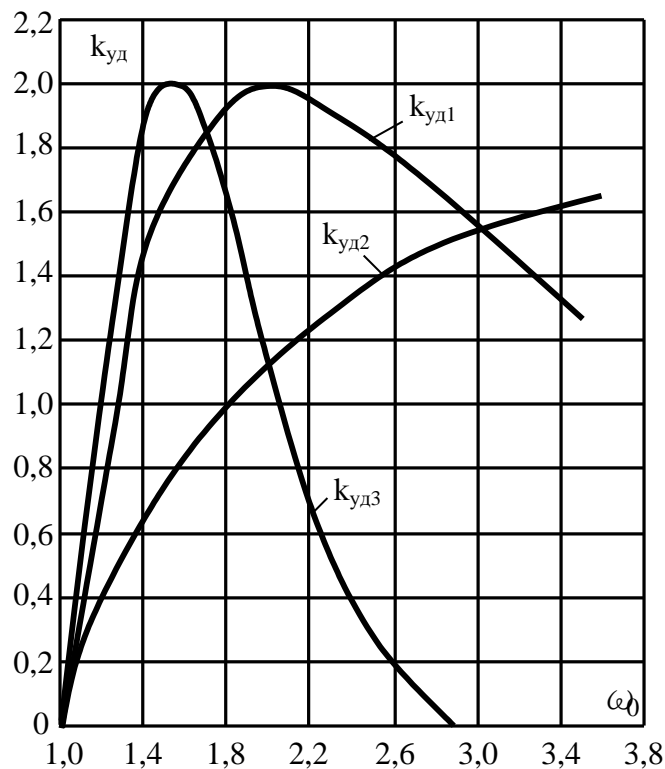


Рисунок В.2 – Залежність ударних коефіцієнтів, що відповідають першим трьом максимумам напруги, від частоти власних коливань при  $\delta = 0$ .

10. Використовуючи вираз  $\delta = r/2x$  та параметри лінії у абсолютних одиницях визначити коефіцієнт затухання контуру;

11. Визначити ударний коефіцієнт комутаційної перенапруги з врахуванням втрат (коефіцієнту затухання) за виразом:

$$k_{y\delta} = k_{y\delta n} * 0.5 \left( 1 + e^{-\delta n \frac{T}{2}} \right)$$

де  $T$  – період власних коливань,  $T = 2\pi / \omega_0$ ;

12. Рівень комутаційної перенапруги під час увімкнення лінії становить:

$$U_{nep} = E * k_C * k_{y\delta}$$

13. Припускаючи, що комутація проходить в момент близький до максимуму напруги між контактами побудувати залежність напруги на ємності від часу користуючись виразом:

$$u_{nep} = U_{вст} \left[ \cos\tau - e^{-\delta\tau} \cos\omega_0\tau \right]$$

де  $\tau$  – синхронний час,  $\tau = 0, \frac{1}{314}, \dots, 3\pi$ ;  $U_{вст}$  – усталене значення напруги в симетричному режимі (у відносних одиницях):

$$U_{вст} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$$

де  $E$  – напруга джерела е.р.с;

Розрахунок:

1.

$$X_0 := 0.32 \quad X_1 := 26.658$$

$$L := \frac{X_1}{X_0}$$

$$L = 83.306$$

2.

$$\gamma := \pi \cdot \frac{L}{3000}$$

$$\gamma = 0.087$$

3.

$$z := 1$$

$$x_1 := z \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad x_1 = 0.044$$

$$b := \left(\frac{1}{z}\right) \cdot \tan(\gamma) \quad b = 0.087$$

4.

$$x_s := 0.5$$

$$x := x_s + x_1$$

$$x = 0.544$$

$$w_0 := \frac{1}{\sqrt{x \cdot b}}$$

$$w_0 = 4.586$$

5.

$$k_{yd} := 0.85$$

6.

$$r := 3.961$$

$$\underline{\underline{x}} := 26.658$$

$$\underline{\underline{\delta}} := \frac{r}{2x} = 0.074$$

7.

$$T = 1 \text{ T}$$

$$\underline{\underline{T}} := \frac{(2\pi)}{w_0}$$

$$k_y := k_{yd} \cdot 0.5 \cdot \left[ 1 + e^{[-(\delta)] \cdot \frac{T}{2}} \right]$$

$$k_y = 0.829$$

8.

$$E := 1$$

$$k_c := \frac{1}{\left( 1 - \frac{1}{w_0^2} \right)}$$

$$k_c = 1.05$$

$$U_p := E \cdot k_c \cdot k_y$$

9.

$$U_{vs} := 0.87$$

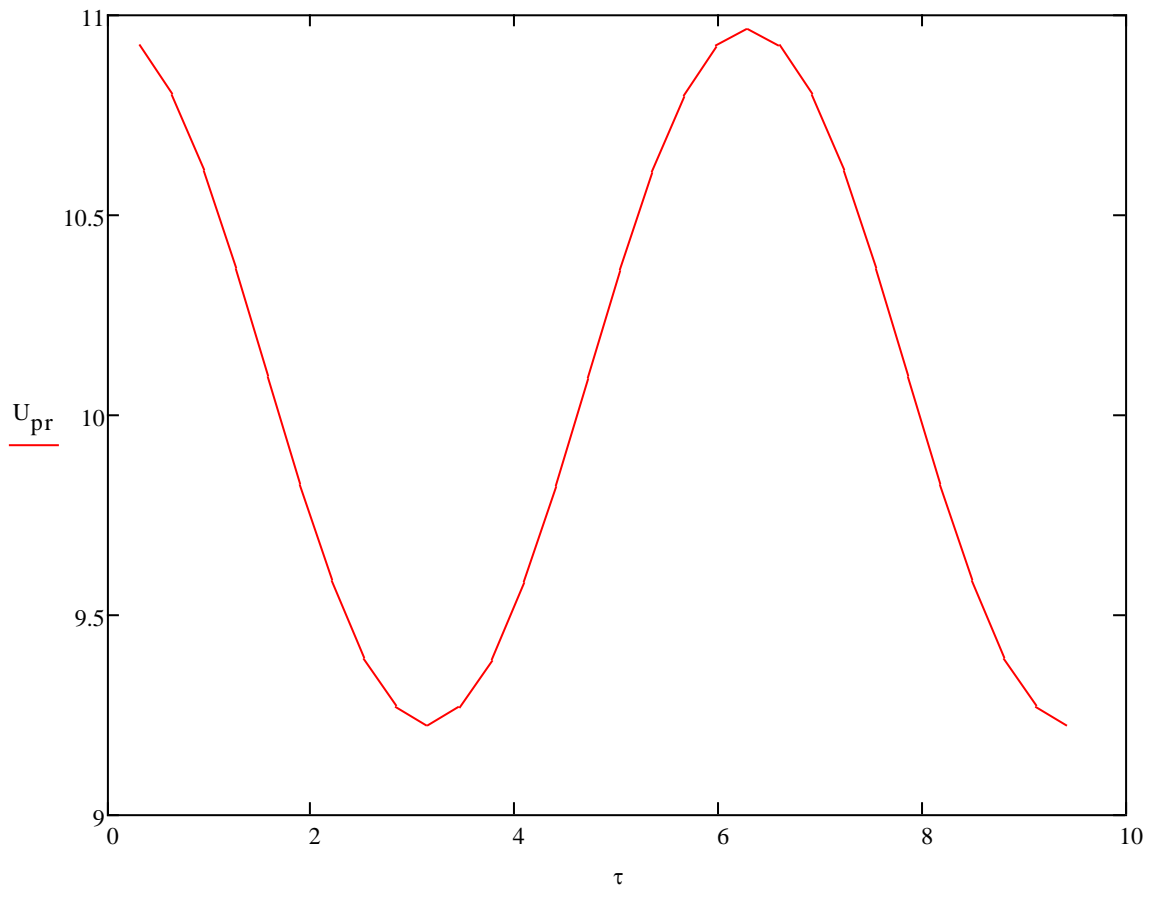
$$U_{pr} := U_{vs} \cdot \left[ \cos(\tau) - e^{-\delta \cdot \tau} \cdot (\cos(w_0) \cdot \tau) \right]$$

$\tau :=$

0.1π  
0.2π  
0.3π  
0.4π  
0.5π  
0.6π  
0.7π  
0.8π  
0.9π  
π  
1.1π  
1.2π  
1.3π  
1.4π  
1.5π  
1.6π  
1.7π  
1.8π  
1.9π  
2π  
2.1π  
2.2π  
2.3π  
2.4π  
2.5π  
2.6π  
2.7π  
2.8π  
2.9π  
3π

$U_{pr} =$

	0
0	10.924
1	10.8
2	10.608
3	10.365
4	10.096
5	9.827
6	9.585
7	9.392
8	9.269
9	9.226
10	9.269
11	9.392
12	9.585
13	9.827
14	10.096
15	10.365
16	10.608
17	10.8
18	10.924
19	10.966
20	10.924
21	10.8
22	10.608
23	10.365
24	10.096
25	9.827
26	9.585
27	9.392
28	9.269
29	9.226
30	



## Додаток Г. Розрахунок напруженості електричного поля

Дано

$$h := 1.8 \quad d := 19 \quad x := -50 \quad r := 0,21 \quad H_0 := 25 \quad u := 750 \cdot \sqrt{3}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} := 1$$

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}$$

Розрахунок

$$m_A := \sqrt{(x+d)^2 + (1-h)^2} = 31.01$$

$$n_A := \sqrt{(x+d)^2 + (1+h)^2} = 31.126$$

$$m_B := \sqrt{x^2 + (1-h)^2} = 50.006$$

$$n_B := \sqrt{x^2 + (1+h)^2} = 50.078$$

$$m_C := \sqrt{(x-d)^2 + (1-h)^2} = 69.005$$

$$n_C := \sqrt{(x-d)^2 + (1+h)^2} = 69.057$$

$$H_{cp} := \frac{(H_0 + 2 \cdot 1)}{3} = 9$$

$$C_{\omega\omega} := \frac{(2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon)}{\ln \left[ \frac{2 \cdot H_{cp} \cdot d}{0.21 \cdot \sqrt[3]{(4 \cdot H_{cp}^2 \cdot d)^2 \cdot \sqrt{H_{cp}^2 + d^2}}} \right]} = 9.874 \times 10^{-11} \frac{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}$$

$$k := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} = 1.798 \times 10^{10} \frac{\text{m}^3 \cdot \text{kg}}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^4}$$

$$k_1 := \left( \frac{x+d}{m_A^2} - \frac{x+d}{n_A^2} \right) = -2.396 \times 10^{-4}$$

$$k_2 := \left( \frac{1-h}{m_A^2} - \frac{1+h}{n_A^2} \right) = -3.722 \times 10^{-3}$$

$$k_3 := \left( \frac{x}{m_B^2} - \frac{x}{n_B^2} \right) = -5.741 \times 10^{-5}$$

$$k_4 := \left( \frac{1-h}{m_B^2} - \frac{1+h}{n_B^2} \right) = -1.436 \times 10^{-3}$$

$$k_5 := \left( \frac{x-d}{m_C^2} - \frac{x-d}{n_C^2} \right) = -2.188 \times 10^{-5}$$

$$k_6 := \left( \frac{1-h}{m_C^2} - \frac{1+h}{n_C^2} \right) = -7.552 \times 10^{-4}$$

$$E := c \cdot u \cdot k \cdot \sqrt{(2 \cdot k_1 - k_5)^2 + 3(k_3 - k_5)^2 + (2 \cdot k_2 - k_4 - k_6)^2 + 3 \cdot (k_4 - k_6)^2} \cdot \frac{1}{2} = 1.891 \times 10^{19} \frac{\text{m}^4 \cdot \text{kg}}{\text{A}^2 \cdot \text{s}^5}$$