

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»

ОБМЕЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧАХ

08-13.МКР.010.00.123 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»
Карпенко І.М. _____

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

Рецензент: _____
«_____» _____ 20____ р.

Вінниця – 2019 року

ЗМІСТ

Анотація.....	5
Annotation.....	6
Вступ.....	7
1 Внутрішні перенапруги та їх дослідження.....	11
1.1 Перенапруги в ізоляції ПЛ.....	11
2. Застосування ОПН для захисту ізоляції ПЛ.....	19
2.1. Конструкція і принцип дії ОПН.....	19
2.2 Квазістаціонарні перенапруги.....	25
2.3. Основні типи ОПН і спосіб їх приєднання до ПЛ.....	27
2.4. Вибір характеристик ОПН і оцінка ризику його пошкодження.....	31
3 Аналітичні методи дослідження перенапруг.....	36
3.1 Системи відносних одиниць при розрахунках перенапруг в електричних системах.....	36
3.2 Метод симетричних складових в розрахунках комутаційних перенапруг.....	38
3.3 Параметри розрахункових схем у каналах прямої і нульової послідовностей.....	39
3.4 Схеми заміщення ліній електропередачі.....	44
3.5 Підвищення напруги на здорових фазах при однофазних замиканнях.....	45
3.6 Основні складові внутрішніх перенапруг і їх розрахункові коефіцієнти.....	50
4.....Експериментальні дослідження внутрішніх перенапруг в діючих мережах.....	52
4.1 Вимірювання внутрішніх перенапруг в діючих мережах. Інформаційно-діагностичний комплекс „Регіна”.....	53
4.2 Розрахунок перехідних процесів на ПК.....	58
5...Комутаційні перенапруги в електричних системах.....	59
5.1 Перенапруги при включенні лінії.....	59
5.2 Перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями.....	60
5.3 Перенапруги під час повторного включення лінії.....	63

5.4	Відновлювальні напруги при відключенні коротких замикань.....	65
6.....	Перенапруги при замиканнях на землю.....	69
6.1	нестійке горіння заземлювальної дуги і розвиток перенапруг.....	69
6.2	Розвиток перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю.....	70
6.3	Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю і обриві проводу.....	75
6.4	Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасильною котушкою.....	77
7	Економічна частина.....	80
7.1	Опис ідеї проекту.....	80
7.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	83
7.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	84
8.	Охорона праці.....	89
8.1	Задачі розділу.....	89
8.2	Аналіз умов праці при виконанні робіт, пов'язаних з обслуговуванням високовольтних ліній електропередачі та проведення робіт під напругою.....	89
8.3	Організаційно-технічні рішення з охорони праці під час виконання робіт під напругою.....	90
8.4	Розрахунок напруженості електричного поля.....	106
	Висновки.....	110
	Література.....	112
	Додаток А Технічне завдання	
	Додаток Б Розрахунок в інформаційно-діагностичному комплексі „Регіна”	
	Додаток В Розрахунок напруженості електричного поля	

АНОТАЦІЯ

Карпенко Іван Миколайович «Обмеження внутрішніх перенапруг в електропередачах». Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. 2019.– 85 с. Бібліогр.: 14. Іл.: 10. Табл.: 12.

Проаналізовано конструктивні особливості масла та обладнання яке діагностує його стан ізоляції. Проведено розрахунок допустимих напруг, стану ізоляції. Розглянуто причини старіння ізоляції, чинники які впливають на швидкість старіння ізоляції. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на персонал, що працює з високовольтним обладнанням.

Ключові слова: частковий розряд, діелектрик, масло-бар'єрна ізоляція, руйнування ізоляції, старіння ізоляції, високовольтне обладнання.

ANNOTATION

Karpenko Ivan Nikolaevich «Restrictions of internal overvoltages in power transmissions». Master's qualification work. - Vinnytsia: VNTU. 2019 - 85 p. Bibliogr .: 14. Ill .: 10. Tabl .: 12. The design features of the oil and equipment that diagnose its insulation condition are analyzed. The permissible voltages and isolation state were calculated. The causes of aging of insulation, factors that influence the speed of aging of insulation, are considered. The analysis of dangerous and harmful factors affecting the personnel working with high-voltage equipment.

Keywords: partial discharge, dielectric, oil-barrier insulation, insulation failure, insulation aging, high-voltage equipment.

ВСТУП

Актуальність теми. Потужні теплові та атомні електричні станції України об'єднані лініями електропередачі 750 кВ для централізованої моделі електропостачання споживачів.

Комутації цих ліній можуть приводити до перенапруг великої кратності. Ось чому перенапруги для ліній 750 кВ перенапруги за трифазного АПВ є визначальними при виборі засобів і заходів для обмеження перенапруг на ізоляції і оцінки пропускну здатності комбінованих розрядників і 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. Досліджені перенапруги можна розбити на такі дві основні групи:

1. Комутаційні перенапруги, істотно пов'язані з перехідним процесом, що виникає в результаті «комутації», розуміючи під цим терміном будь-яке включення або відключення в електричній системі, викликане роботою вимикачів, короткозамикачів, запобіжників (комутаційної апаратури), а також при дугових замиканнях на землю;

2. Резонансні перенапруги, істотно пов'язані зі сталими резонансними коливаннями в системі, в симетричній або несиметричній її схемі.

У свою чергу, кожна з цих груп складається з різних видів перенапруг, класифікація і найменування яких необхідні для подальшого викладу. До групи «комутаційні перенапруги» відносять:

- 1) перенапруги при відключенні ємнісного навантаження ненавантажених довгих ліній і конденсаторних батарей;

2) перенапруги при включенні довгих ліній, зокрема при автоматичних повторних включеннях;

3) перенапруги при відключенні малих індуктивних струмів, зокрема при відключенні ненавантажених трансформаторів, асинхронних двигунів і реакторів. Перенапруги при включеннях і відключеннях можуть розвиватися як у симетричному режимі роботи системи, так і при несиметричних коротких замиканнях; в останньому випадку перенапруги, зазвичай, вищі;

4) перенапруги при дуговому замиканні на землю і нестійкому характері дуги в мережах з ізолюваною і компенсованою нейтраліями.

До групи «резонансні перенапруги» відносять:

1) резонансні перенапруги на робочій частоті, що виникають в дальніх електропередачах при симетричних і несиметричних режимах;

2) перенапруги внаслідок самозбудження обертових машин, що працюють в симетричному режимі;

3) перенапруги на вищих гармоніках в несиметричних режимах;

4) ферорезонансні перенапруги на вищих або нижчих гармоніках, обумовлені нелінійними параметрами ланцюгів із сталлю. Наведена класифікація має умовний характер, тому що у ряді випадків, цілком реальних для електричної системи, можуть виникати перенапруги, що належать до різних груп. Так, наприклад, на резонансні перенапруги можуть накладатися перенапруги, пов'язані з перехідним процесом при комутації. Зазвичай таке накладання веде до появи найвищих за амплітудою перенапруг.

Більшість видів перенапруг має певну кратність відносно робочої напруги мережі. У системах можуть відбуватися короточасні підвищення напруги, обумовлені скиданням навантаження, форсуванням збудження і розгоном генераторів, ємнісним ефектом довгих ліній. Важко провести чітку кількісну межу між перенапругою і підвищенням напруги, наприклад, при скиданнях навантаження. Якісно до підвищень напруги відносять такі перевищення над нормальним рівнем, які безпечні для ізоляції. Проте при

накладенні на ці підвищення напруги комутаційних або резонансних процесів кратності перенапруг істотно підвищуються. Підвищення напруги впливає на вибір розрядників, призначених для обмеження комутаційних перенапруг.

Велике значення має питання про ймовірність появи тих або інших перенапруг. Ця ймовірність пов'язана, по-перше, зі статичним характером деяких процесів, наприклад, гасінням дуги у вимикачах, а по-друге, з імовірністю тих або інших перехідних процесів в системі. Завжди можна знайти такі поєднання перехідних процесів, які дають перенапруги дуже високої кратності. Проте таке поєднання малоімовірне, тому його, зазвичай, не враховують, вважаючи, що в цьому випадку можна допустити перекриття ізоляції (зовнішньої) або спрацювання розрядника з його можливим руйнуванням. В той же час і в цих малоімовірних випадках повинна бути усунута можливість пошкодження внутрішньої ізоляції машин і апаратів. Але не будь-яке накладення перехідних процесів ймовірне. Слід реально зважати на такі процеси, які викликаються однією причиною, або які є наслідком один одного. Саме на такі процеси і слід орієнтуватися при оцінюванні максимальної кратності внутрішніх перенапруг і вибиранні засобів їх обмеження. Експлуатаційний досвід підказує ці режими і ймовірність їх виникнення.

Експериментальним і теоретичним дослідженням внутрішніх 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 750 кВ, які виконано у роботі, є актуальними.

Мета і задачі дослідження.

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

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

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

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

Предметом дослідження є методи і засоби для обмеження внутрішніх 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 ВНУТРІШНІ 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.

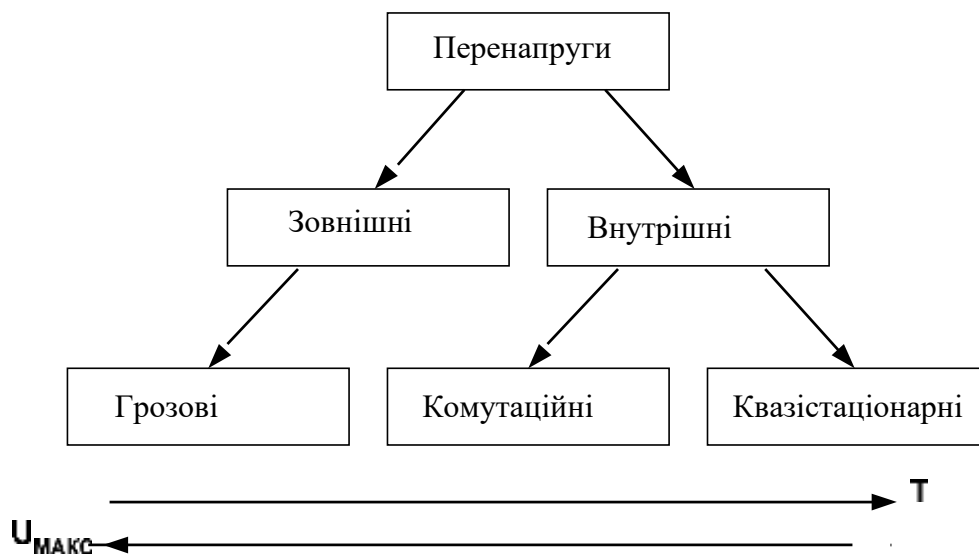


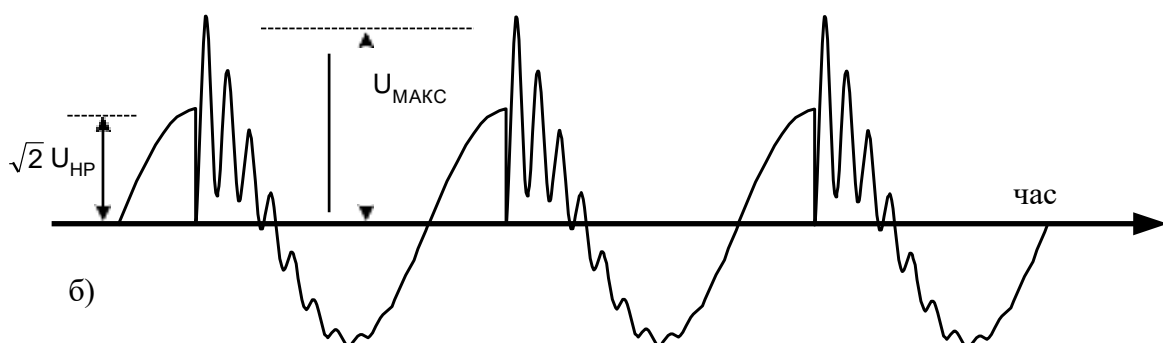
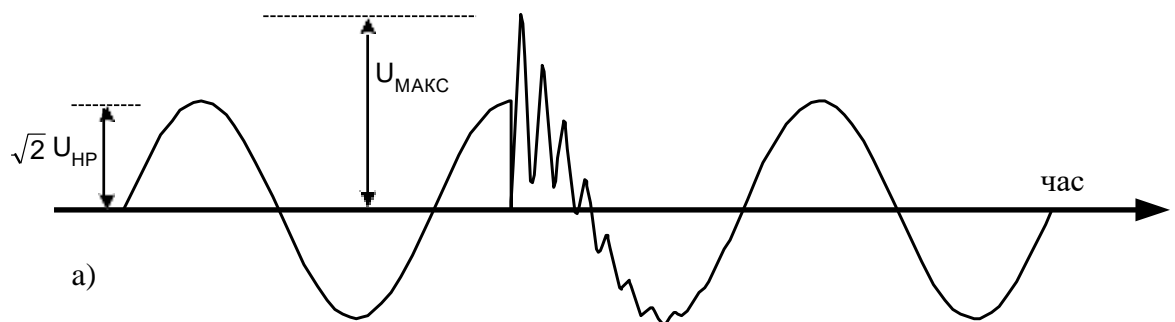
Рисунок 1.1. Спрощена класифікація перенапруг.

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.



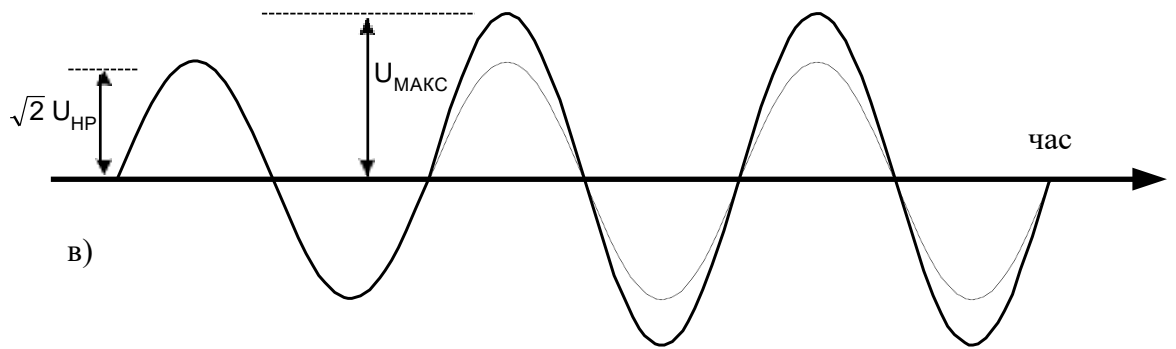


Рисунок 1.2. Приклади перенапруг різної форми і часових параметрів

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-секундної 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-секундної характеристики (рис.1.3), то велика ймовірність перекриття (пробою) ізоляції.

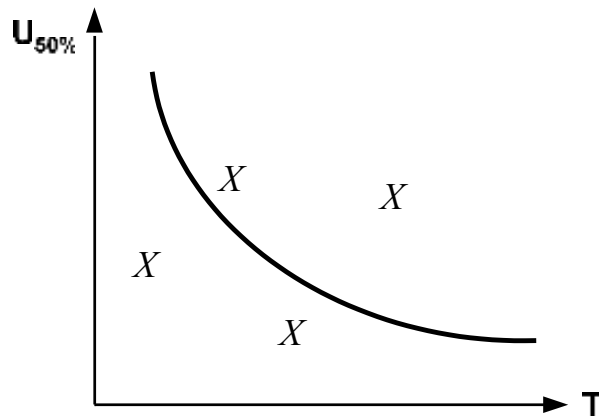


Рис.1.3. Загальний вигляд вольт-секундної характеристики ізоляції обладнання, а також різні поєднання величини перенапруг і їх тривалості («хрестики»).

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 АПВ, 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.

Імовірність 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»

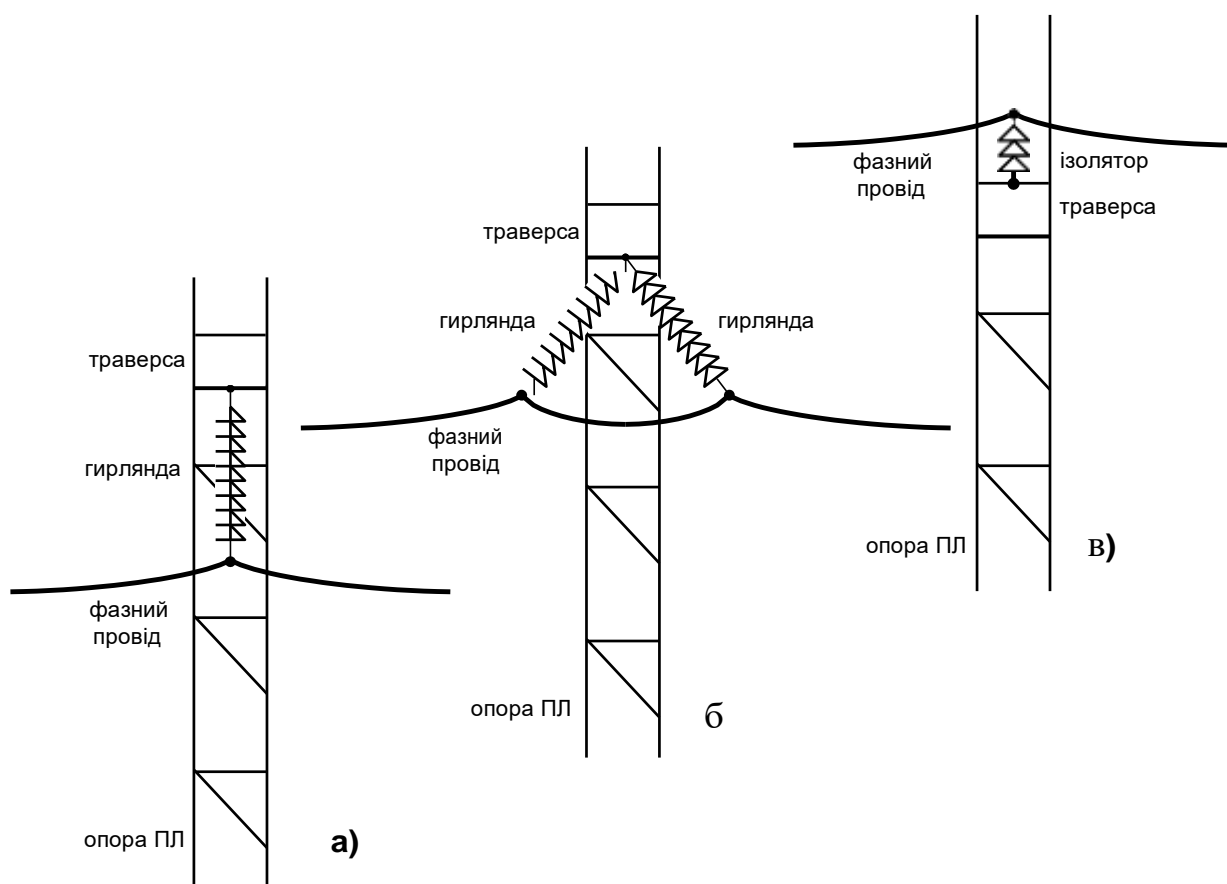


Рисунок 1.4. Найбільш поширені ізолюючі підвіски фазних проводів ПЛ 6-750 кВ: підвісна (а) і натяжна (б) гирлянди ізоляторів; штирьовий ізолятор (в).

Насправді перенапруги є лише однією з причин порушення нормальної роботи повітряних ліній і їх відключення. Серед причин так само відомі:

- 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

Отже, перенапруги і, зокрема, грозові перенапруги далеко не завжди є домінуючими в числі відключень конкретної повітряної лінії. 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).

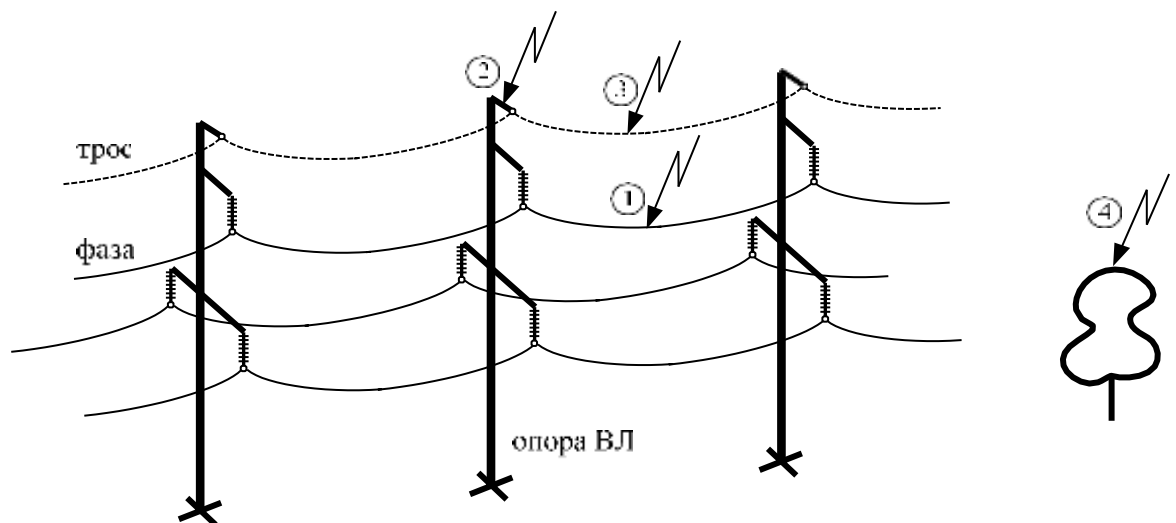


Рисунок 1.5. Розряди блискавки - причини грозових перенапруг на ізоляції ПЛ

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 ВЛ (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 [2,3,17,18] 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 км²), 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.

2. Застосування ОПН 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 грозоупорності ВЛ виявляються неефективними через несприятливі геофізичних умов (високий питомий опір ґрунтів) або метеоумов (високі ожеледно-вітрові навантаження для тросів). Або, наприклад, грозоупорність ВЛ, на якій в повній мірі реалізовані традиційні способи, хоча і є високою з точки зору типових ліній розглянутого класу напруги, проте все ж не влаштовує конкретного споживача. У подібних ситуаціях доводиться говорити про використання нетрадиційних способів підвищення грозоупорності ВЛ, покликаних доповнити собою традиційні.

Найбільш згадуваним нетрадиційним способом підвищення грозоупорності ВЛ всіх класів номінальної напруги називається використання обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН), як ефективного засобу зниження числа відключень ПЛ, викликаних грозовими перенапруженнями. Підвищення грозоупорності ВЛ за допомогою установки на опорах так званих «підвісних» ОПН підтверджується науковими дослідженнями і досвідом експлуатації.

2.1. Конструкція і принцип дії ОПН

Для захисту устаткування розподільчих пристроїв від грозових і

комутаційних перенапруг традиційно використовувалися вентильні 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, виявилось 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 ОПН.

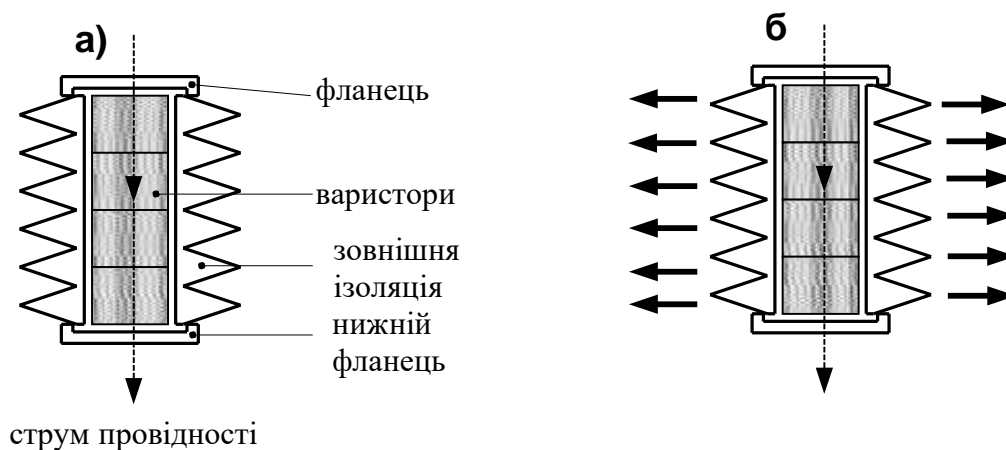


Рисунок 2.1. Основні частини конструкції ОПН і принцип його роботи.

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

Принцип роботи ОПН побудований на різко нелінійної вольтамперної характеристикі варисторів, тобто нелінійної залежності струму від напруги. У нормальному режимі при впливі на ОПН 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 ОПН і в ланцюзі його

заземлення. Отже, для успішної безаварійної роботи ОПН 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 ОПН і його переходу в початковий стан, коли температура варисторів дорівнює або трохи більше температури навколишнього середовища. Навпаки, квазістаціонарних перенапруги можуть призводити до багаторазових спрацьовувань ОПН протягом малого інтервалу часу, недостатнього для охолодження варисторів. Саме тому кажуть, що ОПН призначені для захисту ізоляції від грозових і комутаційних перенапруг, але не призначені для захисту від квазістаціонарних.

Якщо при виготовленні вентиляльних розрядників РВ в якості зовнішньої ізоляції використовувався фарфор, то ОПН прийшли в енергетику разом з полімерною ізоляцією. На гідності полімерній ізоляції в експлуатації вже неодноразово вказувалося: серед них висока гідрофобність (як наслідок - низька ймовірність перекриття по поверхні ізоляції в зволоженому стані), вибухонебезпечність, вандалоустойчивість, малу вагу, здатність працювати в умовах природних і промислових забруднень, широкий діапазон робочих температур і т.п.

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

Великі габарити і вага не давали можливості масово встановлювати РВ на повітряних лініях, тоді як легка і компактна конструкція сучасних ОПН з полімерною ізоляцією зробила їх дуже привабливим для захисту ізоляції ПЛ. Додатковим поштовхом до «популярності» технічного рішення по установці ОПН на ВЛ стали наступні, на жаль помилкові, припущення:

- для надійного захисту ізоляції ПЛ досить розмістити уздовж її траси

обмежене число ОПН, тобто захисна зона ОПН становить багато сотень метрів;

- для надійної роботи ОПН, встановлених на ПЛ, досить застосовувати ОПН, розраховані на менші струми в порівнянні з гострою нирковою недостатністю в розподільних пристроях, тобто ОПН для лінії може бути помітно легше і дешевше аналога для РУ.

Насправді для захисту ПЛ необхідну кількість ОПН може бути можна порівняти з числом опор лінії, а струмові і енергетичні характеристики підвісних ОПН повинні бути не гірше, ніж у підстанційних апаратів. Незважаючи на це ОПН 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 ОПН енергій навіть більших, ніж при грозових перенапруженнях. Це видно, наприклад, при аналізі методик [29] випробувань варисторів, що проводяться для тих, що розробляються конструкцій і типів ОПН: здатність варисторів розсіювати енергію перенапруг перевіряється на імпульсах струму прямокутної форми тривалістю $T_{\Pi} = 2000$ мкс при величині струмів I_{Π} в кілька сотень ампер. З точки зору величини струму подібні дії дійсно схожі на струми в ОПН при обмеженні комутаційних перенапруг, хоча така велика тривалість струму в ОПН можлива лише при комутаціях повітряних ліній довжиною більше 500 км. Однак і за величиною, і за тривалістю подібні випробувальні впливи мають дуже мало спільного з експлуатаційними впливами на ОПН при грозових перенапругах.

У випробуваннях перевірка варисторів на працездатність при грозових перенапруженнях виконується лише з точки зору їх здатності пропускати без пошкодження великі за величиною струми в кілька десятків кА. Одна із головних цілей таких імпульсних впливів - перевірити відсутність перекриттів варисторів по поверхні, але, оскільки тривалість таких випробувальних струмів становить одиниці мікросекунд, то вони не є підставою для оцінки здатності ОПН поглинати енергію грозових перенапруг.

Насправді, всупереч поширеній думці, відбитому в методиках випробувань, в експлуатації в переважній більшості випадків саме грозові перенапруги, а не комутаційні, пред'являють головні вимоги до здатності ОПН розсіювати енергію перенапруг. Покажемо це, спираючись на найпростіші оцінки і здоровий глузд.

Припустимо, що 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 ОПН різних класів напруги енергію краще оцінювати в відносних одиницях найбільшого робочої напруги ОПН

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

де $W_{\text{уд}}$ - питома розсіює енергія, яка за своєю суттю і розмірності (Кл) відповідає заряду, який пройшов через ОПН. 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, в Зокрема, показати, що в мережі 750 кВ ($U_{\text{НР}} = 787$ кВ) комутаційні перенапруги володіють питомою енергією, яка більш ніж в 100 разів вище, ніж для мережі 6

кВ ($U_{нр} = 7.2$ кВ).

Середня довжина ПЛ 750 кВ на порядок перевершує таку для ПЛ 6 кВ. Отже, якби комутаційні перенапруги дійсно були визначальними при виборі ОПН, то в мережах 6 кВ та в мережах 750 кВ були потрібні б ОПН з питомими енергіями, що відрізняються на три порядки. Забезпечити подібне відмінність важко, оскільки питома енергія (заряд) пропорційна площі поперечного перерізу варисторів.

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

Досвід експлуатації показує, що такі ОПН витримують впливу при комутаційних перенапруах навіть в мережах 330-750 кВ.

Вимоги до питомої енергії ОПН:

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

Разом з тим, деякі фахівці помилково вважають, що ОПН при установці на ПЛ повинні бути відбудовані від спрацьовувань при комутаційних перенапруженні, пояснюючи це так:

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

Всі ці міркування щодо впливу комутаційних перенапруг на питання застосування підвісних ОПН мають під собою ґрунт лише тоді, коли мова йде про встановлення на трасі ПЛ єдиного комплекту ОПН 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 ОПН 330-750 кВ, то навіть для довгих ПЛ комутаційні перенапруги перестають бути розрахунковими, оскільки їх енергія ділиться між багатьма ОПН.

Для ПЛ 6-220 кВ, повторимося, незалежно від числа встановлених ОПН про енергію комутаційних перенапруг можна не думати.

2.2 Квазістаціонарні перенапруги

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

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

- збільшення висоти колонки варисторів, тобто підвищення по напрузі вольтамперної характеристики, інакше зване «загрубленіє» ОПН;
- збільшення діаметра колонки варисторів, що при заданій висоті колонки означає збільшення маси ОПН, а значить його здатності поглинати енергію перенапруг без небезпечного перегріву.

Висота ОПН визначається вимогами до мінімально допустимих відстаней від струмоведучих частин до заземлених. Захисні властивості варисторів такі, що будівельна висота ОПН виявляється більше, ніж висота колонки варисторів. Для компенсації різниці висот ОПН і колонки варисторів в конструкції ОПН 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 ОПН і майже не вплине на його вартість.

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

Розглянемо два ОПН з різними вольтамперних характеристик, вільно показаними на рис.2.5. Нехай при заданому струмі падіння напруги на другому

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

Видно, що через різко нелінійної характеристики ОПН невелике підвищення вольтамперної характеристики ОПН по напрузі призводить до помітно більшого зниження струмів в ОПН, а значить підвищенню його надійності. Іншими словами, 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 не повинно викликати сумніву, що при заданому рівні квазістаціонарних перенапруг підвищення надійності роботи ОПН доцільно тільки за рахунок деякого збільшення висоти колонки варисторів, а не за рахунок збільшення її діаметра.

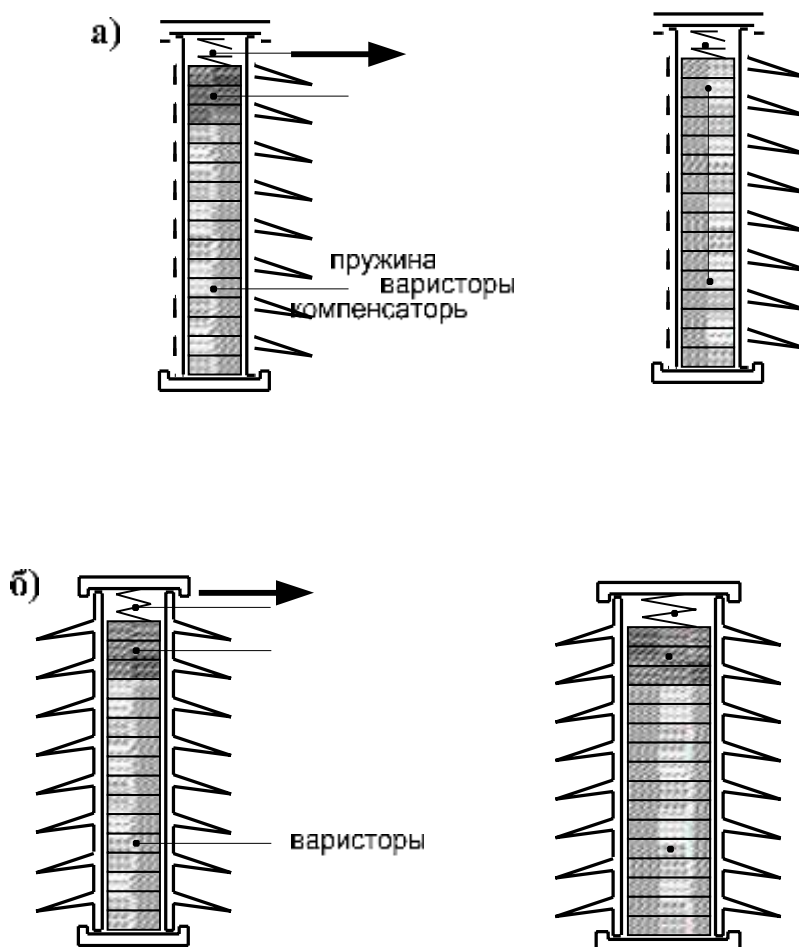


Рисунок 2.4. Різні способи підвищення надійності роботи ОПН: за рахунок

збільшення висоти колонки варисторів (а) або діаметра колонки (б)

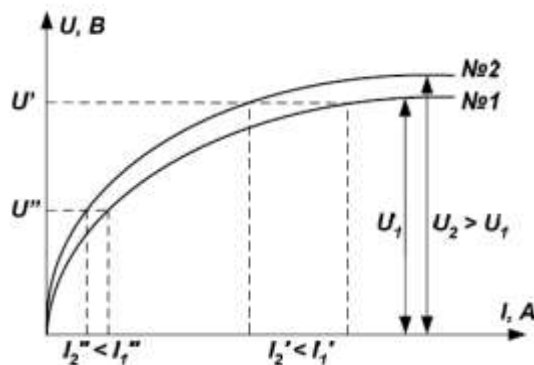


Рисунок 2.5 Підвищення надійності роботи ОПН

2.3. Основні типи ОПН і спосіб їх приєднання до ПЛ

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

ОПН із зовнішнім іскровим проміжком (ОПНІ) не слід плутати з вентильними розрядниками. Дійсно РВ і ОПНІ мають послідовним іскровим проміжком, проте є такі відмінності:

- в конструкції ОПНІ використовується зовнішній іскровий проміжок, а в конструкції РВ - внутрішній;

- в конструкції ОПН і ОПНІ використовуються нелінійні елементи набагато досконаліші, ніж в конструкції РВ.

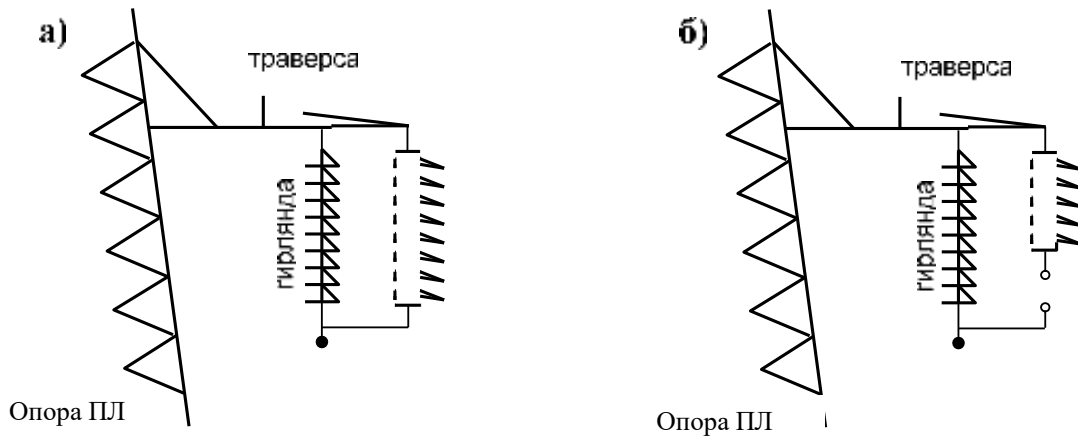


Рисунок 2.6. Принципові способи кріплення ОПН до опори: (а) - без іскрового проміжку, (б) - через зовнішній іскровий проміжок.

У конструкції ОПН іскровий проміжок (ІП) налаштовується на спрацьовування при грозових перенапруженнях, виключаючи вплив на нелінійні елементи нормального робочого напруги мережі, а також квазістаціонарних і комутаційних перенапруг. Перераховані особливості ОПН, як це прийнято вважати, є його перевагами, проте, насправді:

- комутаційні перенапруги слід враховувати лише для протяжної повітряної лінії 330-750 кВ і тільки тоді, коли на ній встановлений єдиний комплект ОПН;
- квазістаціонарних перенапруг майже не становлять небезпеки для ОПН при правильному виборі [30] його найбільшої робочої напруги $U_{нро}$
- для підвищення надійності ОПН на ПЛ допустимо застосовувати ОПН з підвищеним $U_{нро}$, оскільки ізоляція ПЛ має більшу імпульсну міцність в порівнянні з внутрішньою ізоляцією РУ;
- тривалий вплив на ОПН робочої напруги мережі згідно з дослідженнями [31] призводить до відновлення первісної вольтамперної характеристики ОПН, компенсуючи деградацію властивостей нелінійних елементів, викликану проходженням імпульсних струмів;
- тривалий вплив напруги «підсушує» апарат, знижуючи ризик його зволоження.

Лише для довгих ПЛ 330-750 кВ при одиничній установці ОПН наявність іскрового проміжку є певною перевагою ОПН, тоді як в інших випадках іскровий проміжок - скоріше недолік. Крім того, відсутність іскрового проміжку дозволяє:

- прискорити вступ ОПН в роботу з обмеження перенапруг;
- виключити невірну роботу проміжку внаслідок помилок монтажу;
- розсіювати енергію грозових перенапруг одночасно у великій кількості ОПН, знижуючи навантаження на кожен з них і підвищуючи надійність технічного рішення [32].

Найважливішим фактором, який слід враховувати при виборі способу приєднання ОПН до опори, є можливість подальшої експлуатації ПЛ в разі пошкодження одного з встановлених ОПН.

ОПНІ, як правило, має жорстке кріплення до опори, необхідне для забезпечення сталості габаритів іскрового проміжку. При виході з ладу ОПН, встановленого через іскровий проміжок, на ВЛ з'являється місце з ослабленою електричною міцністю. Виявлення такого ОПН буває утруднено, оскільки пошкодження ОПН може ніяк не позначитися на його зовнішньому вигляді, а значить, не завжди цей апарат можливо виявити візуальним оглядом при обході ПЛ.

Відсутність іскрового проміжку робить можливим приєднання ОПН до опори за допомогою гнучкого шлейфа, в який встановлюється спеціальний пристрій - «відділювач» (рис.2.7, а). Відокремлювач:

- не проявляє себе в нормальному режимі роботи, коли через ОПН проходять струми провідності ОПН, складові частки міліампер;
- не проявляє себе в режимі обмеження грозових і комутаційних перенапруг, коли через ОПН проходять імпульсні струми;
- 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 ОПН в ньому пройде струм однофазного короткого замикання мережі, який

призведе до швидкого руйнування «відділювача» і від'єднання ОПН 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 ізольованою або компенсованою нейтраллю (це 6-35 кВ) в разі пошкодження ОПН справа йде складніше, так як в ОПН протікають лише малі (ємнісні) струми однофазного замикання на землю, які не здатні привести до надійного спрацьовування звичайного «Відділювача». Відсутність конструкції «отделителя» для мереж 6-35 кВ до недавнього часу було фактором, серйозно стримує застосування ОПН на ПЛ 6-35 кВ. В даний час така конструкція, яка отримала назву «Універсальний відділювач» (УВ), розроблена, випробувана і запатентована.

При однофазному замиканні в мережах 6-35 кВ внаслідок малості 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 ОПН, то через кілька хвилин його УВ зруйнується, від'єднавши ОПН 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 одне з них пов'язано з пошкодженням встановленого на лінії ОПН, то в такому ОПН пройде струм короткого замикання, який призведе до швидкого (за частки секунди) руйнування відповідного УО, розриву шлейфу і від'єднання ОПН від лінії ще до вимкнення ПЛ головними вимикачами. При цьому розрив шлейфа:

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

Наявність у ОПН іскрового проміжку, що не дозволяє використовувати

будь-якої відділювач, може бути виправдано лише в деяких випадках при одиничній установці ОПН на протяжних ПЛ 330-750 кВ. У всіх інших випадках приєднання ОПН до ПЛ має бути безіскрова:

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

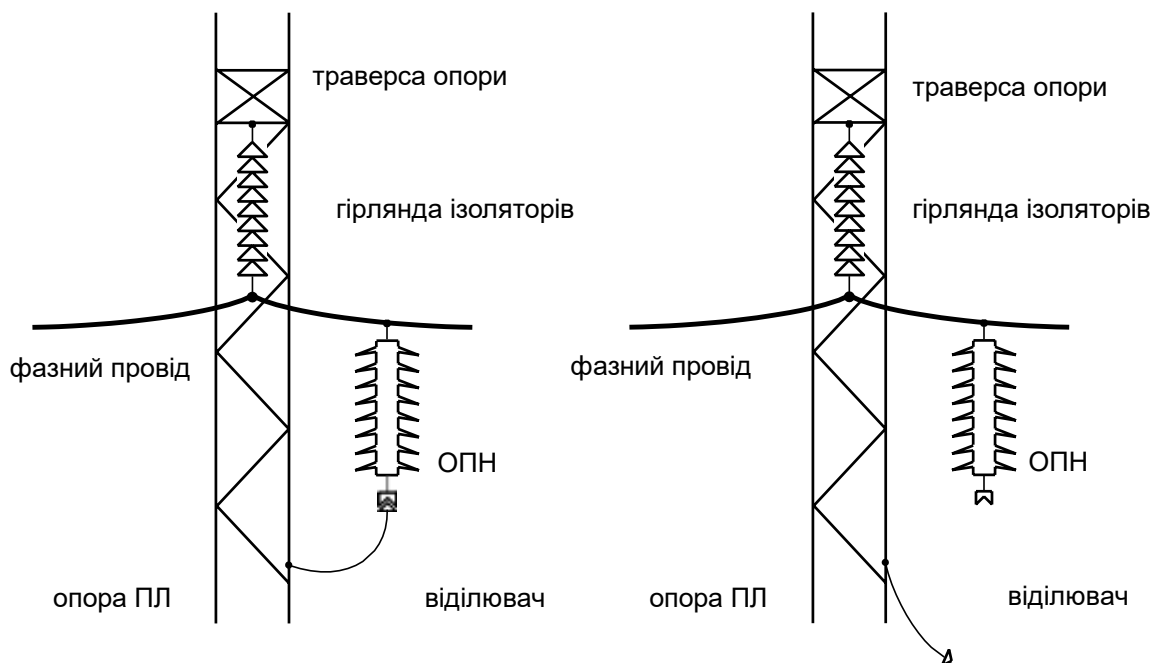


Рисунок 2.7. Варіант приєднання до опори ОПН без іскрового проміжку через відділювач: (а) - до пошкодження ОПН, (б) - після uszkodження

2.4. Вибір характеристик ОПН і оцінка ризику його пошкодження

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

В [30] показано, що основними характеристиками ОПН, 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 ОПН пропускати значні за величиною імпульсні струми.

Найбільша робоча напруга $U_{НРО}$ визначає:

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

Оскільки, як було показано, в рамках заданого класу напруги ОПН конкретне значення залишається напруги слабо впливає на число грозових відключень ПЛ, то з двох перерахованих факторів основна увага треба приділяти першому, тобто займатися підвищенням надійності роботи ОПН. Рекомендації по $U_{НРО}$ зведені в табл.2.1.

Імпульс великого 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 риси нанесено на всіх наведених раніше малюнках, що стосуються струмових впливів на ОПН. Вибір $I_{4/10} = 100\text{кА}$ має на меті підвищити надійність роботи ОПН, перш за все, при прямих розрядах блискавки в фазні проводи ПЛ.

Таблиця 2.1. Рекомендовані значення $U_{НРО}$ і $I_{4/10}$, покликані підвищити надійність ОПН.

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

Питома енергія. На жаль, здатність ОПН поглинати енергію W при грозових імпульсних токах (величиною в десятки кілоампер і тривалістю в десятки мікросекунд) спеціальними випробуваннями не перевіряється. Побічно W можна оцінити на основі робочих випробувань ОПН другого і більш високих

класів пропускної здатності [29], в рамках яких на ОПН в сукупності з напругою промислової частоти впливають $N = 2$ імпульсних струму прямокутної форми тривалістю $T = 2000$ мкс і величині I_{Π}

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

де $K \approx 2$ - кратність обмеження перенапруг

Питомою енергією N імпульсів струму називається величина енергії, приведена до найбільшої робочої напруги ОПН:

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

Для ОПН 110 кВ, що має найбільшу робочу напругу $U_{\text{НРО}} = 88$ кВ і струм пропускної здатності $I_{\Pi} = 1000$ А, припустиму енергію можна оцінити як $W \approx 1000$ кДж. Таке значення в вигляді жирної вертикальної риски нанесено на всіх наведених раніше малюнках, що стосуються енергетичних впливів на ОПН.

При розрядах блискавки в фазні дроти і опори (ВЛ без троса) енергія в найбільш навантаженому ОПН 110 кВ може помітно перевершувати рівень 1000 кДж, тобто завжди існує ризик пошкодження встановлених ОПН.

Ризик пошкодження ОПН залежить:

- від питомої енергії ОПН $W_{\text{уд}}$ (або від енергії W);
- від наявності у ОПН зовнішнього іскрового проміжку;
- від опору заземлення опор;
- від наявності троса;
- від числа фаз, в які на опорі встановлені ОПН;
- від числа опор з гострою нирковою недостатністю.

У разі, коли ОПН встановлені лише на кількох опорах уздовж траси ПЛ, отримати оцінку $N_{\text{ОПН}}$ не представляється можливим, оскільки вона пропорційна числу розрядів блискавки в лінію поблизу від розглянутого ОПН і його опори, а це

число, залежне від великого числа складно чинників, що враховуються, назвати важко. Довіряти можна лише усередненим по трасі лінії оцінками числа розрядів блискавки.

В таблиці 2.1, видно, що річне число ушкоджень ОПН істотно знижується з ростом допустимих енергетичних впливів на ОПН (з ростом його питомої енергії $W_{уд}$ або пропорційній їй величині – струму пропускної здатності $I_{П}$). Пошкодження ОПН викликає коротке замикання на ПЛ і вимагає її відключення з подальшим запуском циклу АПВ, успішність якого залежить від факту наявності універсального відділювача УВ.

Якщо ПЛ захищена за допомогою порівняно «легких» ОПН з струмом пропускної здатності $I_{П} = 500$ А, то частота пошкоджень ОПН 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» ОПН неприпустимо, а рекомендується використання порівняно «важких» ОПН 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).

Табл.2.2, а. Оцінка по (2.4) річного числа пошкоджень ОПН при їх установці в усі три фази кожної опори одноланцюгової ВЛ 110 кВ без троса.

$R_3, \text{ Ом}$	$I_{П}, \text{ А}$	D_{ϕ}	$\phi P^*)$	D_o	$o P^{**})$	$N_{ОПН}, \text{ на } 100 \text{ км і } 100 \text{ год}$
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 2.2, б. Оцінка по (2.4) річного числа пошкоджень ОПН при їх установці в усі три фази кожної опори одноланцюгової ПЛ 110 кВ з тросом.

$R_3, \text{ Ом}$	$I_{\text{п}}, \text{ А}$	D_{ϕ}	ϕP^*	$(D_{\text{о}} \cdot P_{\text{о}} + D_{\text{т}} \cdot P_{\text{т}})^{**}$	$N_{\text{опн}}$, 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

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 τ , причому

$$\tau = \omega_s t,$$

де, ω_s - кругова синхронна частота, с^{-1} ; t – момент часу, с.

У відносних одиницях часу кругова синхронна частота $\omega_{s*} = \omega_{\text{баз}} = 1$.

Будь-яка інша частота у відносних одиницях рівна

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

За базисну напругу $U_{\text{баз}}$ приймається максимальна фазна напруга мережі U_{ϕ} . 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
$U_{\text{баз}} = U_{\phi}$	$U_{\text{баз}} = U_{\phi}$
$z_{\text{баз}} = z_{\phi}$	$I_{\text{баз}} = I_{н.тр}$
$I_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{z_{\text{баз}}} = I_{\text{нат.л.}}$	$z_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}}}$

$$P = U_{\text{баз}} \cdot I_{\text{баз}} = P_{\text{нат.л.}} \cdot 3$$

$$P = U_{\text{баз}} \cdot I_{\text{баз}} = P_{\text{ном.тр.}} \cdot 3$$

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

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

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

$\omega_{\text{с*}} = 1$, то $x_* = \omega_{\text{с*}} L_* = L_*$ і $b_* = \omega_{\text{с*}} C_* = C_*$, 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.

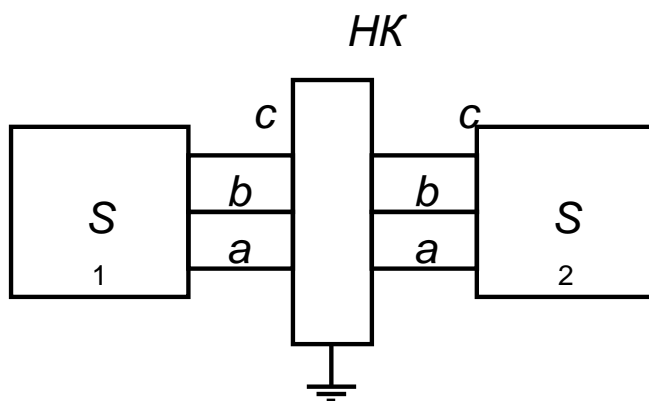
У всіх подальших розрахунках, за деяким винятком, використовуються відносні одиниці. Для спрощення запису знак зірочки на величинах, виражених у відносних одиницях, буде опущений. Таким чином, приймається $\omega_s = 1$; $L = x$; $C = b$; $U = \Psi$.

3.2 Метод симетричних складових в розрахунках комутаційних перенапруг

Під час розрахунків перехідних процесів в несиметричних комутаціях широко використовується метод симетричних складових (method of symmetrical components), 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. 1.1. З обох боків від довільної несиметричної комутації, умовно показаній на рис. 1.1,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. 1.1,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 замкнених 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.



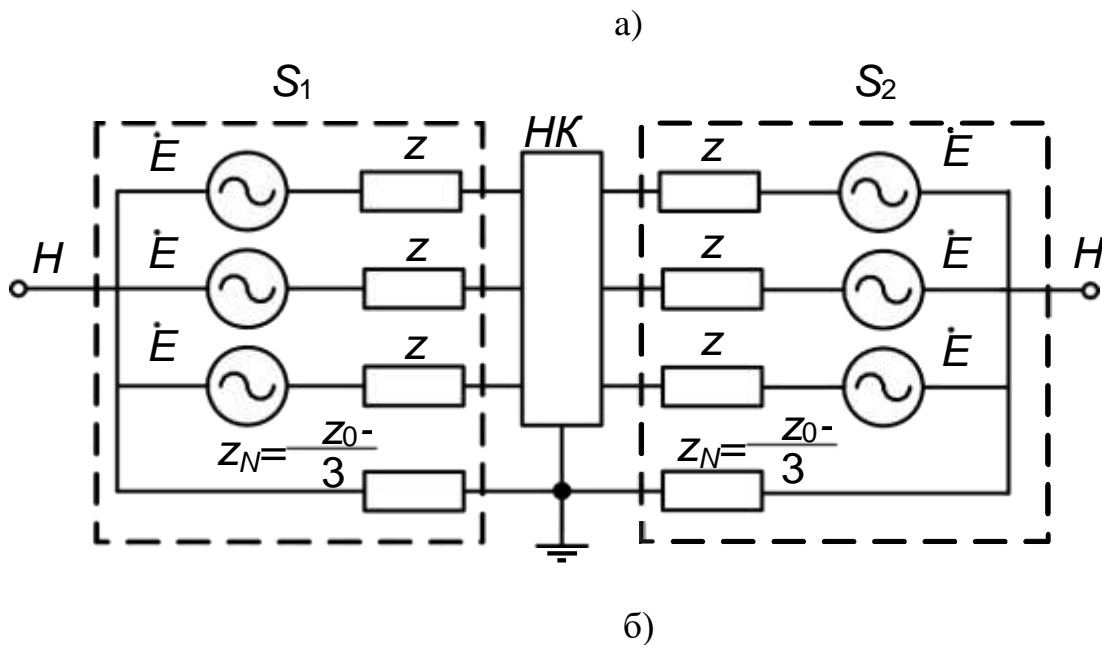


Рисунок 3.1 – Універсальна комплексна схема: а - початкова; б – розрахункова

За схемі на рис. 3.1, б опір z_0 рівний потрійному опорю з точок а, б, 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. 1.1,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:

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

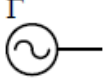


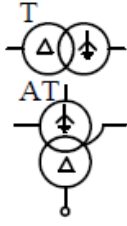
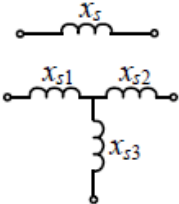
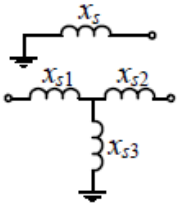

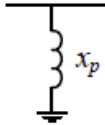
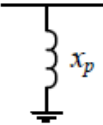
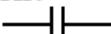
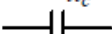
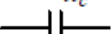
де, ω - кругова частота виражена в частках від частоти;

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 	X'' 	
Г АТ 	x_5 x_{51} x_{52} x_{53} 	x_5 x_{51} x_{52} x_{53} 
Р 	x_p 	x_p 
ПК 	x_c 	x_c 

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/Ом•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

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

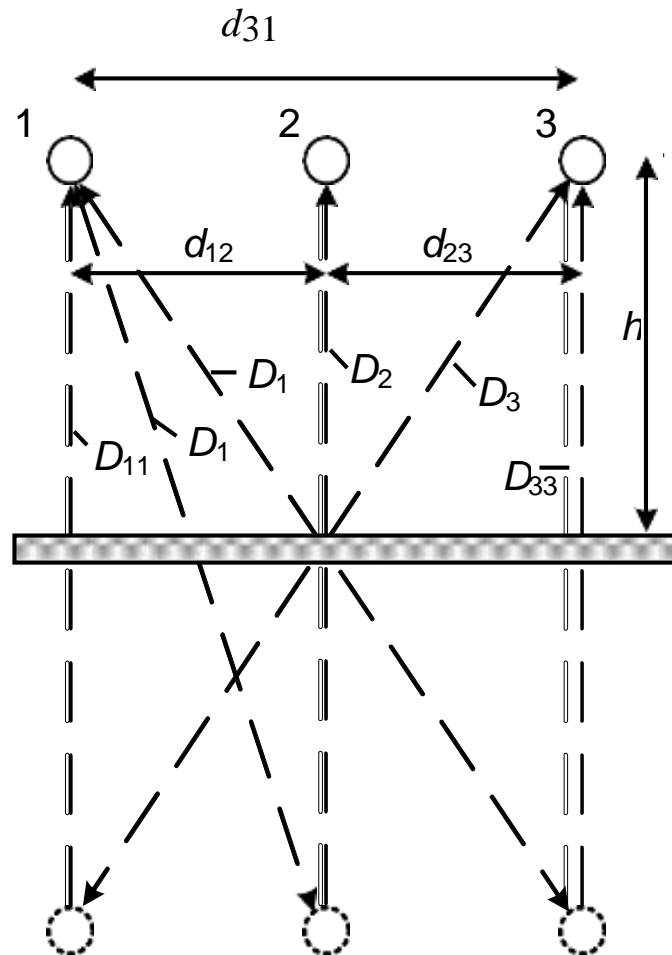


Рисунок 3.3 – Геометричні розміри лінії

– 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	$r_1 = r_{np}$ $x_1 = 29f \cdot 10^{-4} \lg \frac{d}{r_{екв}}$	$g_1 = 0$ $b_1 = \frac{7,56}{\lg \frac{D_0 d}{r_{екв} D}} 10^{-6}$
Нульова послідовність	$r_0 = r_{np} + 3\pi^2 f \cdot 10^{-4}$ $x_0 = 87f \cdot 10^{-4} \lg \frac{D_3}{D_{екв}}$	$g_0 = 0$ $b_0 = \frac{7,56}{\lg \frac{D_0 D^2}{r_{екв} d^2}} 10^{-6}$

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/Ом·км	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Хвильовий опір, Ом	270	590
Швидкість розповсюдження хвилі, км/с	$2,95 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^5$

3.4 Схеми заміщення ліній електропередачі

Лінії передачі є елементами з розподіленими параметрами, тому схеми, що містять лінії передачі, мають, взагалі кажучи, нескінченну кількість власних частот коливань. При крутих фронтах хвиль комутаційного походження необхідне врахування великого числа власних частот і, відповідно, лінія повинна заміщатися ланцюговою схемою з великим числом ланок. В цьому випадку простіше враховувати хвильовий процес на лінії з багатократними відбиттями хвилі у вузлових точках. Хвилі комутаційного походження мають переважно пологий фронт, і в цьому випадку лінія може заміщатися простими Т- або П-подібними

схемами. Параметри схеми заміщення обчислюються для частоти ω , яка еквівалентує дії внутрішньої перенапруги (часто беруть $\omega = \omega_s = 1$). На цій частоті електрична довжина лінії рівна λ . Параметри Т-подібної схеми обчислюються за формулами:

$$x = z * \sin \frac{\lambda}{2}; \quad b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \lambda; \quad (3.1)$$

параметри П-подібної схеми – за формулами:

$$x = z * \sin \lambda; \quad b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (3.2)$$

Формули спрощуються, якщо $z=1$ відн. од. Для коротких ліній (до 200–250 км), тобто малих λ , $\sin \lambda = \operatorname{tg} \lambda = \lambda$ і формули спрощуються до вигляду (при $z=1$):

$$x = \frac{\lambda}{2}; \quad b = \lambda; \quad (3.1,a)$$

П- подібної схеми:

$$x = \lambda; \quad b = \frac{\lambda}{2}. \quad (3.2,a)$$

Схеми заміщення з параметрами згідно з формулами (3.1) або (3.2) достатньо точно заміщають лінію на частоті, для якої визначені параметри x і b , і приблизно справедливі для розрахунку перехідних процесів в схемах, в яких комутаційні хвилі мають достатньо пологий фронт.

3.5 Підвищення напруги на здорових фазах при однофазних замиканнях

Однією з основних причин застосування заземленої нейтралі в мережах напругою 110 кВ і вище є ізоляційна проблема; заземлення нейтралі обмежує підвищення напруги на здорових фазах при однофазних коротких замиканнях. Розглянемо це питання детальніше. На рис. 1.4, наведено структурну

схемумережі, в якій відбулося однофазне коротке замикання. Побудуємо для неї універсальну комплексну схему. Така схема показана на рис. 1.4,б.

Напруги $\dot{E}_a, \dot{E}_b, \dot{E}_c$ є еквівалентними джерелами симетричної напруги, z_1 і z_0 — еквівалентними опорами у каналах прямої і нульової послідовностей. Фаза a заземлена через опір заземлення R_c фази b і c ізольовані.

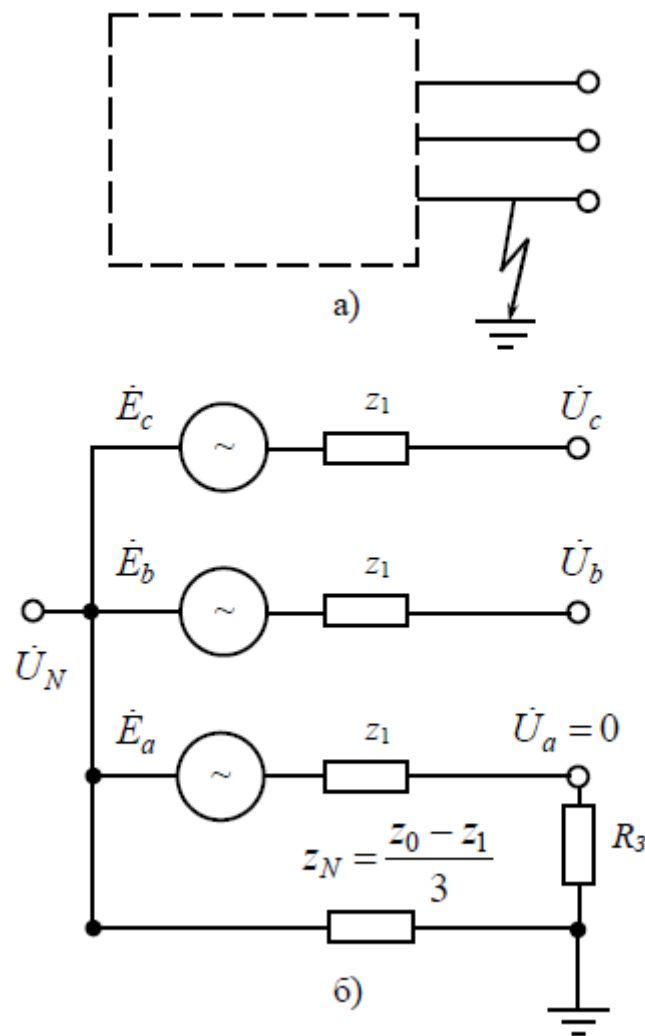


Рисунок 3.4 – Універсальна комплексна схема для несиметричної комутації – однофазного короткого замикання:

а) початкова схема; б) розрахункова схема

Відповідно до схеми на рис. 3.4,б напруги здорових фаз рівні:

$$\dot{U}_b = \dot{E}_b - \dot{U}_N; \quad \dot{U}_c = \dot{E}_c - \dot{U}_N,$$

а

$$\dot{U}_N = \dot{E}_a \frac{z_0 - z_1}{2z_1 - z_0 + 3R_3}$$

Підставляючи значення \dot{U}_N і враховуючи, що \dot{E}_a , \dot{E}_b , \dot{E}_c утворюють симетричну трійку векторів, отримуємо:

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= 0 \\ U_b &= E_a \frac{(a^2-1)\frac{z_0}{z_1} + (a^2-a) + a^2\frac{3R_3}{z_1}}{2 + \frac{z_0}{z_1} + \frac{3R_3}{z_1}} \\ U_b &= E_a \frac{(a-1)\frac{z_0}{z_1} + (a-a^2) + a\frac{3R_3}{z_1}}{2 + \frac{z_0}{z_1} + \frac{3R_3}{z_1}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

де $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

Зазвичай можна нехтувати активними опорами прямої послідовності, тобто прийняти $z_1 = jx_1$. Активні опори нульової послідовності мають істотну величину, і тому приймається $z_0 = r_0 + jx_0$.

На рис. 1.5 наведено криві залежностей напруги U_b/E_a і U_c/E_a від відношення реактивних опорів x_0/x_1 при різних r_0/x_1 і $R_c = 0$. Позитивним x_0/x_1 відповідає область заземленої нейтралі системи, негативним x_0/x_1 , коли x_0 має ємнісний характер, відповідає область ізольованої нейтралі. Як видно з кривих, напруга на фазі с вища, ніж на фазі b, і вони однакові тільки при $r_0 = 0$. Відношення U_b/E_a та U_c/E_a , що характеризують підвищення напруги на здорових фазах при однофазних коротких замиканнях, позначаються через коефіцієнт заземлення k_c .

В області заземленої нейтралі зі зростанням x_0/x_1 і r_0/x_1 напруги U_b/E_a та U_c/E_a зростають, прямуючи при $x_0 \rightarrow \infty$ або $r_0 \rightarrow \infty$ до $\sqrt{3}$.

Зазвичай, в розрахунках перенапруг нехтують активними опорами і, відповідно, приймають $z_0/z_1 = x_0/x_1$. В цьому випадку $U_b = U_c$. Використовуючи будь-яку з формул (1.3), знаходимо:

$$K_3 = \frac{U_{b,c}}{E} = \left[1 + e^{\pm j \frac{\pi}{2}} \left(1 - \frac{3x_1}{2x_1 + x_0} \right) \right] = \left[1 + e^{\pm j \frac{\pi}{2}} \left(1 - \frac{I_{к.з.}^{(1)}}{I_{к.з.}^{(3)}} \right) \right] \quad (3.4)$$

де $I_{к.з.}^{(1)}$ і $I_{к.з.}^{(3)}$ — значення струмів однофазного і трифазного короткого

замикання в точці комутації. Формула (3.4) зручна в розрахунках, оскільки струми короткого замикання в мережах зазвичай відомі. Формулі (3.4) відповідають кривій $r_0/x_1=0$ в правій області рис. 3.5.

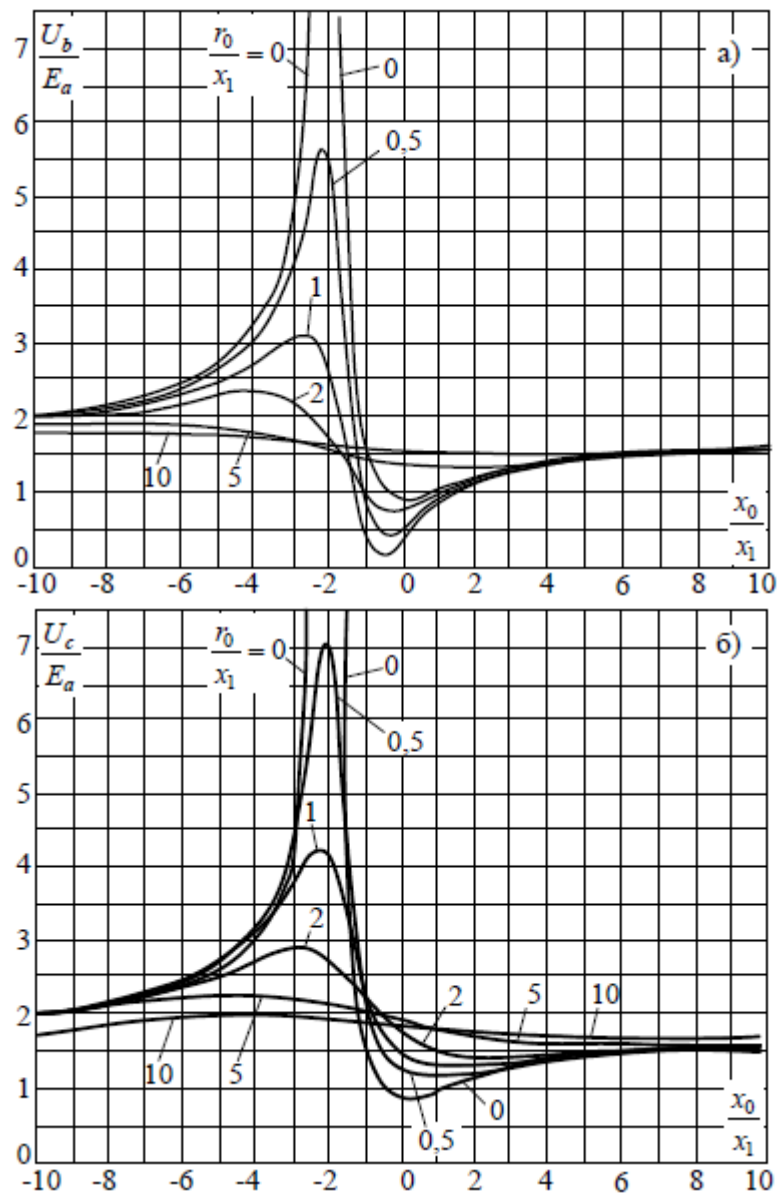


Рисунок 3.5 – Криві залежності напруги на здорових фазах b і c від відношення x_0/x_1 для різних r_0/x_1 при однофазному короткому замиканні на фазі,
 а) криві $U_b/Ea=f(x_0/x_1)$; б) криві $U_c/Ea=f(x_0/x_1)$;

Області ефективно заземленої нейтралі відповідають значення $x_0/x_1 \leq 3$. За кривими на рис. 3.5 або за формулою (3.4) знаходимо, що $x_0/x_1 = 3$ і $r_0/x_1 = 0$ відповідає $k_3 = 1,25$. З урахуванням того, що $E_a > U_\phi$ і $r_0 > 0$, нормами для вибору ізоляції встановлено підвищення напруги робочої частоти на здорових фазах до $0,8U_n = 1,38U_\phi$.

В області ізольованої нейтралі при значенні $x_0/x_1 = -2$ виникає резонанс. Резонанс виникає між індуктивним опором прямої послідовності і ємнісним опором нульової послідовності (опором ємностей фаз на землю). Напруги на здорових фазах згідно з кривими на рис. 1.5 зростають до дуже високих значень. Практично подібний резонанс можливий тільки в дуже розгалужених кабельних мережах, які живляться відносно малопотужним джерелом. Але в таких мережах, як правило, встановлюється дугогасильна котушка, що різко підвищує $|x_0|$ мережі. При $x_0/x_1 \rightarrow \infty$ k_3 прямує до $\sqrt{3}$. Отже, в нескінченності область значень кривих на рис. 1.5 в правій і лівій областях зливаються.

Криві на рис. 3.5 належать випадку $R_3 = 0$. Вплив опору заземлення R_C показаний кривими на рис. 3.6. На осі ординат відкладено відношення U_{max}/E_a , де U_{max} - максимальна напруга на фазах b і c . При зростанні R_3/x_1 до одиниці коефіцієнт k_3 зростає. Подальше підвищення R_3/x_1 веде до зниження k_3 . Очевидно, що при $R_C = \infty$ коротке замикання відсутнє і $k_3 = 1$.

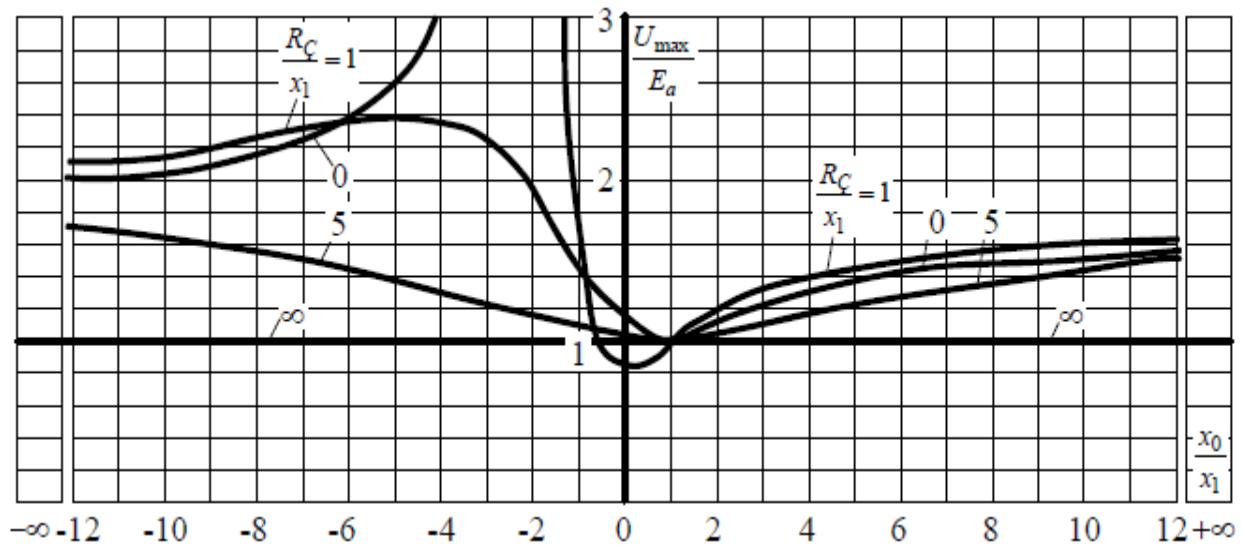


Рисунок 3.6 – Криві залежності максимальної напруги на здорових фазах від відношення x_0/x_1 для різних R_3/x_1 при однофазному короткому замиканні,

$$z_1 = 0 + jx_1; \quad z_0 = 0 + jx_0$$

3.6 Основні складові внутрішніх перенапруг і їх розрахункові коефіцієнти

У нормальному режимі джерела напруги – генератори (зокрема синхронні компенсатори) мають е.р.с., які не більше ніж на 5% перевищують максимальну робочу напругу мережі. Але в перехідних режимах ці е.р.с. можуть істотно зрости за рахунок підвищення швидкості обертання роторів генераторів і зростання струму збудження. Такий процес виникає при скиданні навантаження з генератора після відключення короткого замикання, наприклад, в схемі блоку генератор – трансформатор – лінія. При короткому замиканні на шинах приймальної станції пристрій АРЗ форсує струм збудження. Після відключення короткого замикання зникає розмагнічувальний струм статора і зростає потік збудження. Одночасно внаслідок скидання навантаження зростає швидкість обертання ротора генератора. В результаті підвищуються частота і напруга генератора. На практиці в результаті дії АРЗ і регуляторів турбін напруга на виводах генератора E навіть в блоковій схемі підвищується лише до 1,2-1,3 U_ϕ і лише в окремих випадках до більших величин.

Напруга на лінії підвищується внаслідок ємнісного ефекту. Підвищення напруги спостерігається на працюючих лініях в режимі мінімального навантаження і

особливо на ненавантажених (односторонньо включених) лініях. Проходження ємнісного струму I_c через реактивний опір x_s мережі приводить до підвищення напруги U відносно напруги джерела E . Це підвищення пропорційне I_c і x_s . Відношення напруг U/E , пов'язане з ємнісним ефектом в симетричній схемі мережі, позначається через ємнісний коефіцієнт k_c . У простому коливальному контурі без втрат ємнісний коефіцієнт визначається за виразом:

$$k_c = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$$

Таким чином, усталена напруга в симетричному режимі

$$U_{уст} = k_c E \quad (3.5)$$

Іншою причиною підвищення фазної напруги в системах може бути однофазне коротке замикання. Як було показано в підрозділі 3.3, це підвищення напруги характеризується коефіцієнтом k_3 . При ефективно заземленій нейтралі і коефіцієнт k_3 лежить в межах 1–1,4; при ізольованій нейтралі $k_3 = \sqrt{3}$. Зазвичай протягом часу короткого замикання напруга на здорових фазах встигає встановитися таким чином, що коефіцієнт k_3 характеризує усталену напругу. Вплив всіх чинників визначає кратність усталеної напруги при короткому замиканні

$$U_{уст} = k_3 k_c E . \quad (3.5,а)$$

Високі сталі перенапруги виникають також при несиметричних комутаціях фаз в результаті е.р.с. ферорезонансних коливань на вищих і нижчих гармоніках. У загальному випадку

$$U_{уст} = k_{уст} E, \quad (3.5,б)$$

де $k_{уст}$ – коефіцієнт перенапруги, що встановилася.

У перехідному процесі, викликаному комутацією (включенням або відключенням вимикача, коротким замиканням, обривом проводу і т. д.), амплітуда

напруги $U_{пер}$ перевищує усталену напругу $U_{уст}$. Відношення напруг $U_{пер}/U_{уст}$ позначається через ударний коефіцієнт (collisional coefficient) $k_{уд}$. Отже,

$$U_{пер} = k_{уст}k_{уд}E . \quad (3.6)$$

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В ДІЮЧИХ МЕРЕЖАХ

Найбільш цінний матеріал про внутрішні перенапрути 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. Прикладом можуть слугувати дослідження на електропередачах 750 кВ, які проводилися в 70-х роках минулого століття. 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 перенапрути, 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 внутрішніх 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 комплексу 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 налаштовувати 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 "ТНП 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. 2.1). 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 вхідних 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.

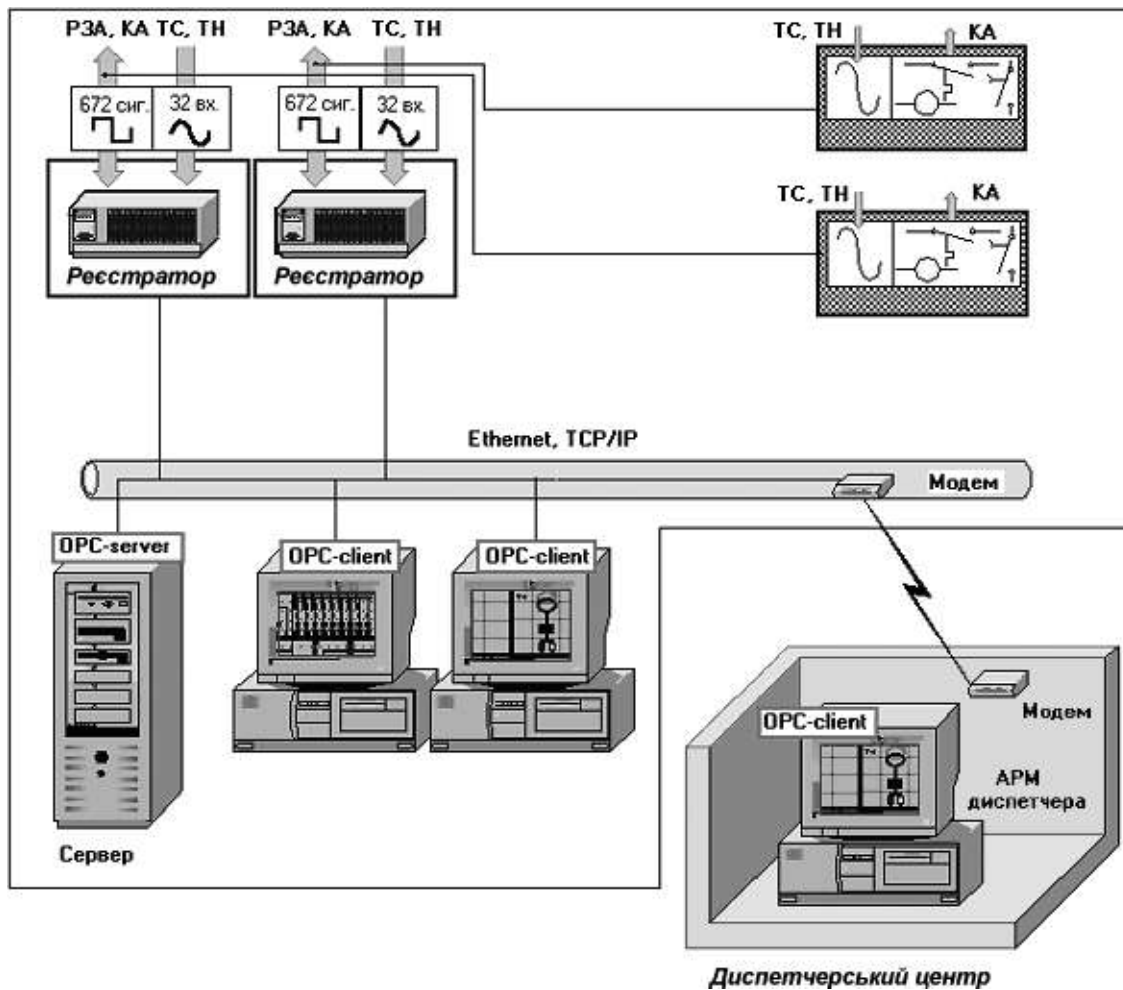


Рисунок 4.1 – Структурна схема підключення інформаційно-діагностичного комплексу “Регіна”

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.

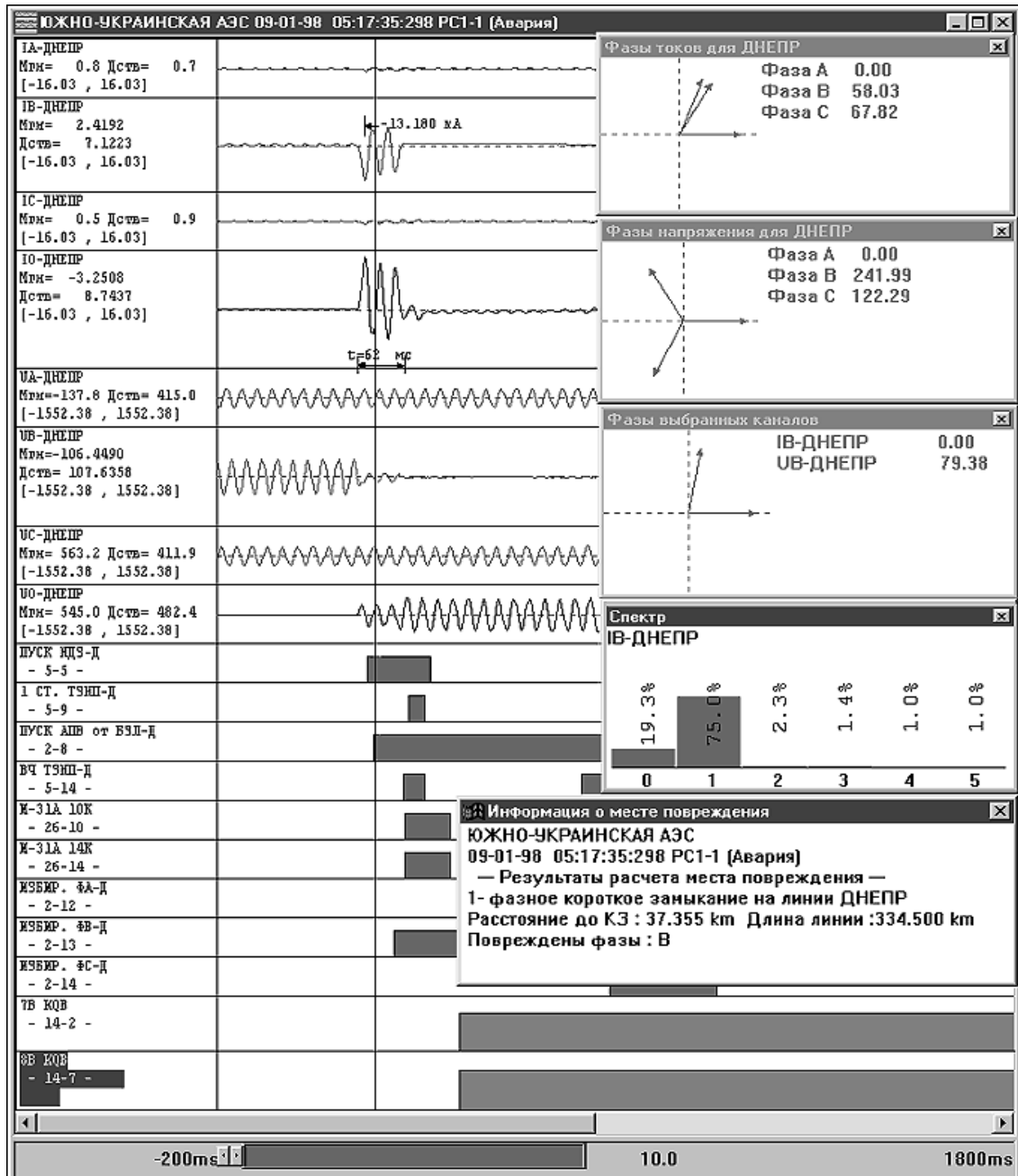


Рисунок 4.2 – Відображення інформації на АРМ диспетчера

4.2 Розрахунок перехідних процесів на ПК

Перехідний процес на довгих лініях при комутації протікає у формі хвильового процесу. Розрахунок хвильового процесу на лінії без втрат проводиться на основі так званого цифрового методу розрахунку. У вузлах обчислюються заломлені і відбиті хвилі, причому обчислення містять тільки арифметичні дії над числами – дискретними значеннями хвиль. З цієї причини обчислення перехідних процесів в схемах з довгими лініями ефективно здійснюються на ПК. У вузлах з реактивними елементами застосовують відомі алгоритми розрахунку звичайних диференціальних рівнянь або ж заміщають реактивні елементи L , C лініями. Трифазні системи приводяться до однофазних на основі комплексних схем заміщення або ж застосовується матричний метод розрахунку в фазних і симетричних координатах. В даний час практика розрахунку перехідних процесів на ПК використовується для дослідження комутаційних перехідних процесів в дальніх електропередачах.

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.

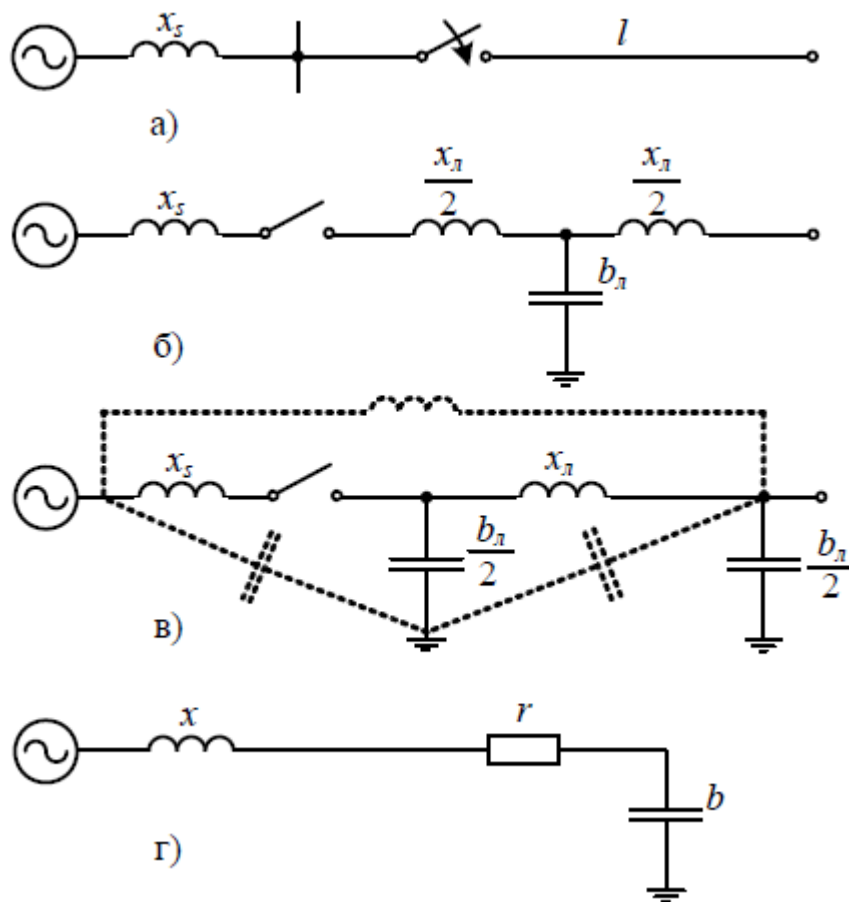


Рисунок 5.1 – Схеми для розрахунку перенапруг при включенні лінії,

а – початкова схема; б – Т-подібна схема заміщення; в – П-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 rxb (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 ненавантажену 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:

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

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:

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

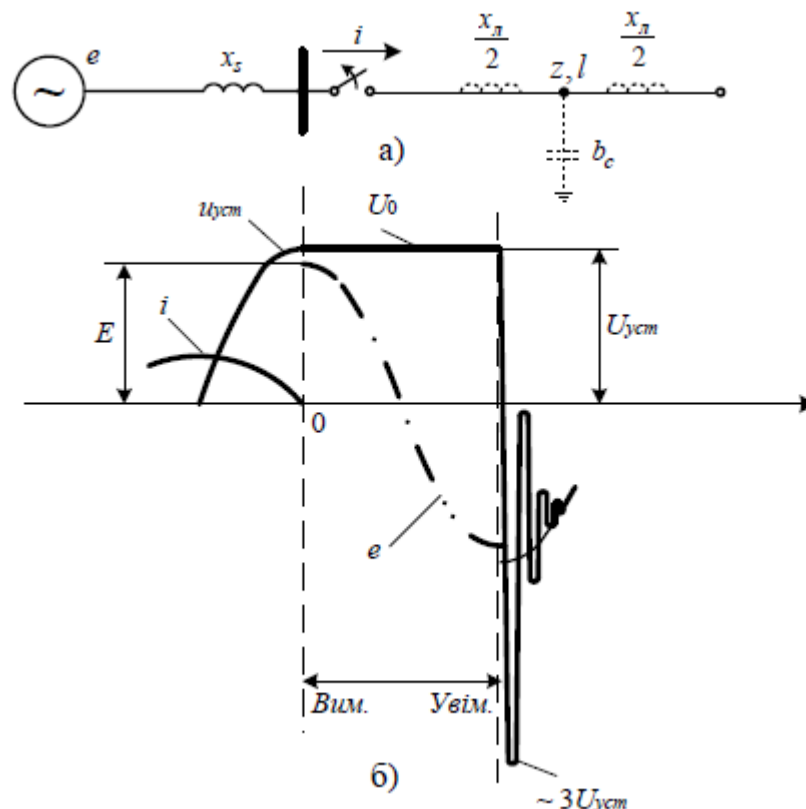


Рисунок 5.2 – Вимкнення ненавантаженої лінії з повторними пробоями

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

Якщо тепер при деякій фазі ψ , 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 ψ , 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 ємнісного струму і початку зростання $u_{\text{в}}(t)$. За час Δt 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.

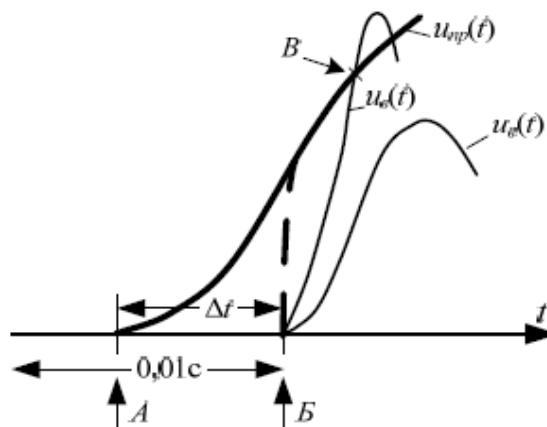


Рисунок 5.3 – Криві відновлювальної напруги $u_{\text{в}}$ та відновлювальної ізоляції $u_{\text{пр}}$

для вимикача лінії під час інтервалу Δt між початком розходження контактів та гасінням дуги.

A – момент розходження контактів; B – момент гасіння дуги;

B – повторне запалення

Оскільки момент розходження контактів абсолютно випадковий, тобто величина Δt 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 $u_e(t)$ перетинає криву $u_{np}(t)$; якщо цей перетин відбувається у момент максимуму $u_e(t)$, то перенапруги на лінії досягають максимального значення. Підставляючи у формулу (5.1) $\psi = 0$, знаходимо, що амплітуда $U_{пер}$ з урахуванням ємнісного ефекту сягає $(3 \div 3,5) U_{ф}$.

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.

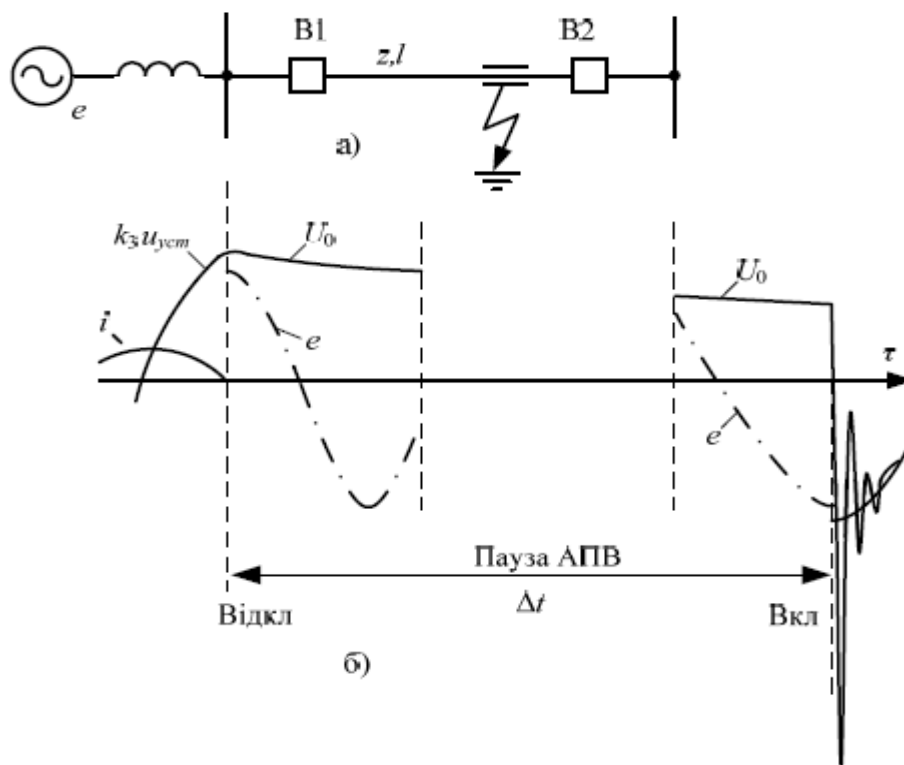


Рисунок 5.4 – Відключення і включення лінії в циклі АПВ,

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 емнісний 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 ВІ 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 витoku 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 емностях 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

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

при неуспішному АПВ

$$u_{\text{пер}} = U_{\text{уст}} k_3 [\cos \tau - (1 + k_q) \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}], \quad (5.2,6)$$

де k_3 визначається по кривих на рис. 5.2.

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

при успішному АПВ

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

при неуспішному АПВ

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

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_v (τ) виражається формулою

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

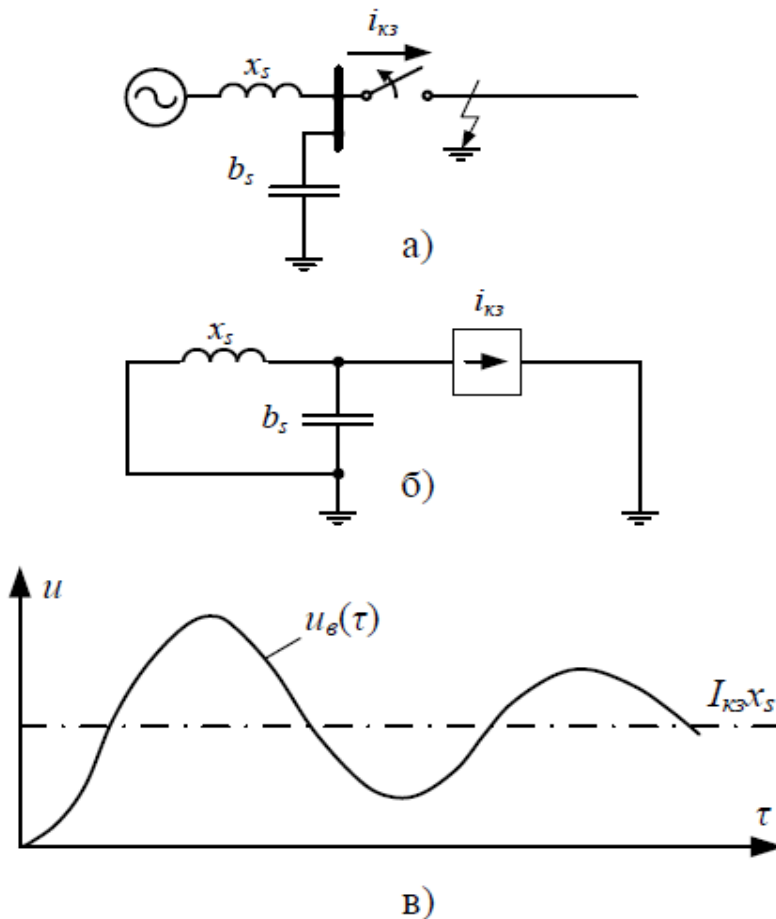


Рисунок 5.5 –
Відключення короткого замикання за вимикачем
а – початкова схема; б – розрахункова схема; в – крива $u_a(\tau)$

Крива $u_6(\tau)$ показана на рисунку 5.5,в. На початковій ділянці кривої $u_6(\tau)$ визначають $\frac{\Delta u_6 \tau}{\Delta \tau}$ – 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 зтягує відключення короткого замикання або навіть приводить до руйнування дугогасильних камер вимикача. За сучасними нормами вимикачі повинні маркуватися не тільки за потужністю $P = \sqrt{3} U_n I_{kz}$ 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 $u_6(\tau)$.

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 $u_{\sigma}(\tau)$ виражається

$$u_{\sigma} = I_{\text{кз}} x_s \left[(1 - \cos \omega_{0,1} \tau) e^{-\delta_1 \tau} + \frac{x_l}{x_s} (1 - \cos \omega_{0,2} \tau) e^{-\delta_2 \tau} \right]. \quad (5.4,а)$$

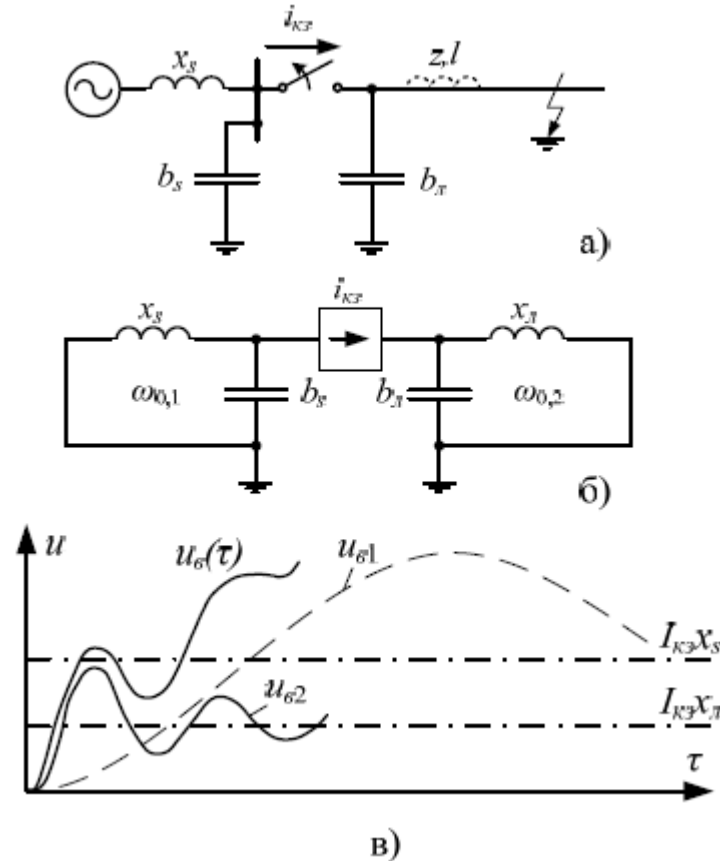


Рисунок 5.6 – Відключення невіддаленого короткого замикання,

а – початкова схема; б – розрахункова схема; в – крива $u_{\sigma}(\tau)$ 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 $I_{\text{кз}} = \frac{E}{x_s + x_l}$ практично не відрізняється від струму к.з. на шинах живильної підстанції, напруга $I_{\text{кз}} * x_l$ вже достатньо висока, а частота відновлювальної напруги, з боку лінії $\omega_{0,2}$, ще велика. Крива $u_{\sigma}(\tau)$ та її складові для невіддаленого короткого замикання, побудовані за формулою (3.4,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_{a1} нарастає 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. ПЕРЕНАПРУГИ ПРИ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

6.1 Нестійке горіння заземлювальної дуги і розвиток перенапруг

Металеве замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю приводить до підвищення напруги на здорових фазах до $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ (завідсутності резонансних явищ). Такі напруги нормальна ізоляція цих мереж повинна витримувати тривало. Якщо ж замикання на землю відбувається через нестійку дугу, горіння якої супроводжується повторними згасаннями і запалюваннями, то на здорових, а також на ушкоджених фазах мережі можливий розвиток перенапруг.

Перенапруги виникають при нестійкому горінні заземлювальних дуг і супроводжуються зсувом нейтралі системи, що може бути викликано залишковими зарядами на ємностях при гасінні дуги. Було висунуто дві основні теорії розвитку перенапруг. Відповідно до першої теорії (Петерсена) залишкові заряди в системі зумовлені гасінням дуги замикання на землю в момент проходження через нуль струму високочастотного коливання, що виникає при запалюванні дуги, аналогічно тому, як це має місце у вимикачах при відключенні ємнісного навантаження. Відповідно до другої теорії (Петерс і Слепян) гасіння дуги відбувається при проходженні струму робочої частоти через нульове значення. Імовірність того або іншого механізму гасіння дуги визначається деіонізувальними факторами, що впливають на дугу.

Гасіння відкритої дуги в повітрі звичайно управляється струмом робочої частоти. Дуга в маслі може часто гаснути і при проходженні через нуль високочастотного струму. Більшість дослідників сходяться на тому, що можливі обидва механізми гасіння заземлювальної дуги. Відповідно до того або іншого механізму гасіння дуги будується теорія дугових перенапруг – за Петерсоном або за Петерсом та Слепяном. Обидві теорії дають верхні значення амплітуд перенапруг.

Істотну роль у механізмі розвитку дугових перенапруг відіграє не стільки питання про момент гасіння дуги, скільки фактор відновлення електричної ізоляції

дугового проміжку після гасіння дуги. Від швидкості відновлення ізоляції дугового проміжку залежить можлива амплітуда зсуву потенціалу всієї системи, а отже, і можливі перенапруги.

6.2 Розвиток перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізолюваною нейтраллю

Припустимо, що в трифазній мережі виник режим однофазного замикання на землю (рис. 6.1), в результаті чого відбувся ряд повторних запалювань і загасань дуги, а також накопичився вільний заряд, який після чергового загасання дуги рівномірно розподіляється по ємностях фаз b_{ϕ} і створює на нейтралі напругу зсуву U_{zc} .

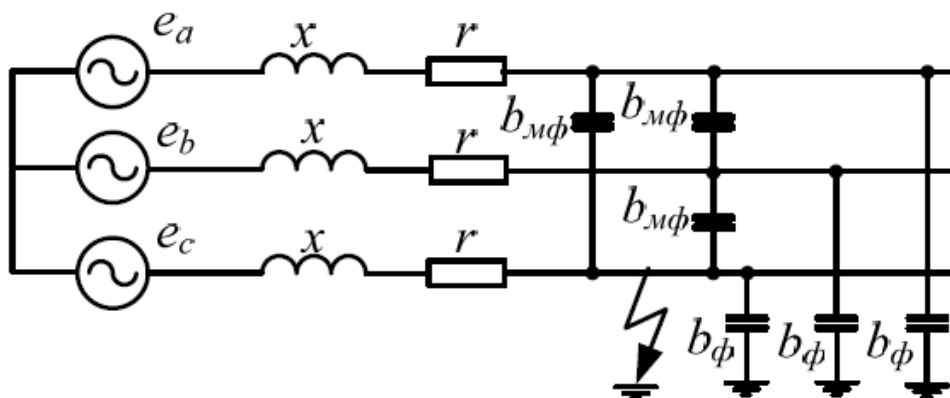


Рисунок 6.1 – Трифазна система з ізолюваною нейтраллю при дуговому замиканні на землю

Напруга U_{zc} накладається на фазні е.р.с. джерела e_a , e_b , e_c і створює напруги на фазних ємностях мережі. Напруга на ушкодженій фазі а відновлюється після гасіння дуги з власною частотою мережі $\omega_0 \gg 1$ з нульового значення до значення $u_a = e_a + U_{zc}$ (рис 6.2). У ході високочастотного коливального процесу напруга u_a досягає максимального значення – піка гасіння $U_{п.г.}$. Величина цього піка обмежена відновленням ізоляції дугового проміжку. Найбільша величина $U_{п.г.}$

виникає, якщо дуга гаситься в момент мінімуму напруги $e_a + U_{зс}$ на фазі, як це показано на рис. 6.2. В цьому випадку $U_{п.г.} = 2 * (U_{зс} - U_{\phi})$, звідки:

$$U_{зс} = U_{\phi} + \frac{U_{п.г.}}{2}. \quad (6.1)$$

Коливальне відновлення напруги на ураженій фазі a не призводить до негайного повторного запалювання дуги лише в тому випадку, якщо $U_{п.г.}$ буде менше відновлювальної ізоляції дугового проміжку. Обробка багатьох осцилограм, знятих під час спеціальних дослідів в мережі 6-10 кВ, показала, що максимальна величина $U_{п.г.}$ обмежена ізоляцією дугового проміжку і становить $0,4U_{\phi}$. Тоді з формули (6.1) знаходимо, що максимальна величина $U_{зс}$ рівна $1,2U_{\phi}$ (додатного або від'ємного знака).

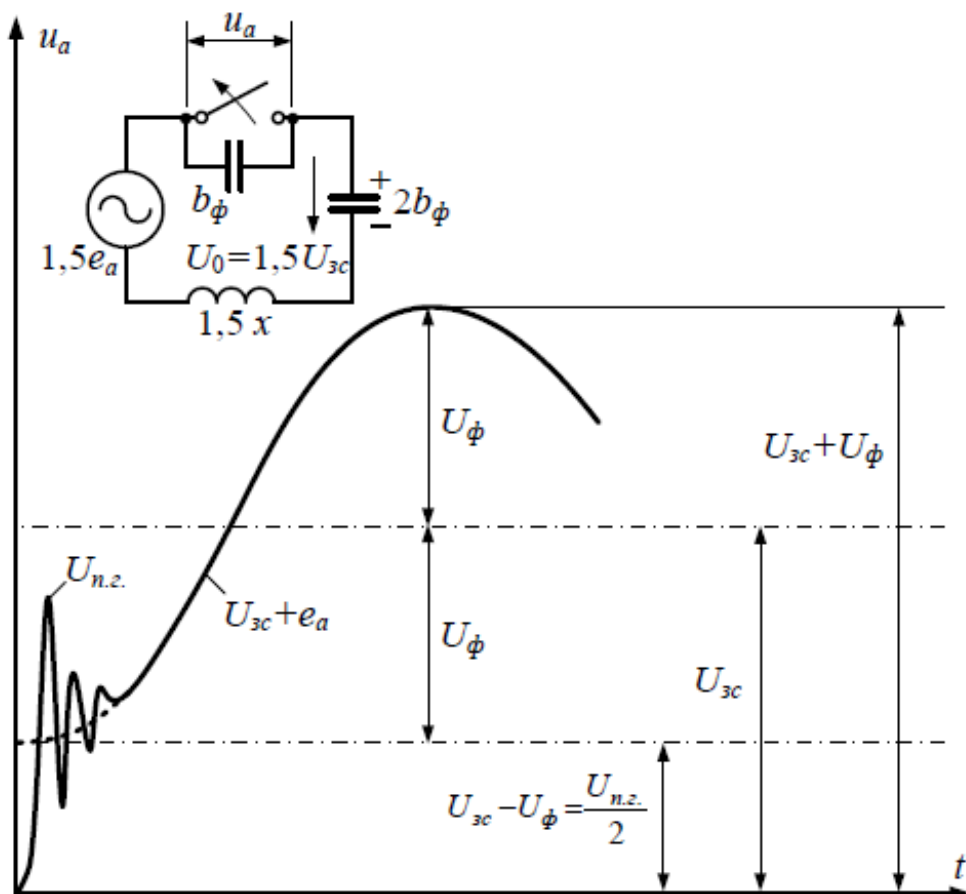


Рисунок 6.2 – Відновлення напруги на ушкодженій фазі при гасінні ємнісної дуги замикання на землю

Визначимо тепер можливі перенапруги в трифазній мережі (див. рис. 6.1).

Величина перенапруги визначається за формулою:

$$u_{\text{пер}} = u_{\text{уст}} + (u_{\text{уст}} - u_{\text{п}}) * \frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{\text{м}\phi}} * (1 - d), \quad (6.2)$$

де $u_{\text{уст}}$ і $u_{\text{п}}$ – установлена і початкова напруги на фазах при повторному запалюванні;

$\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{\text{м}\phi}}$ – коефіцієнт, що враховує зменшення амплітуди коливань через вплив міжфазних ємностей;

d – коефіцієнт загасання високочастотних коливань.

Напруга на будь-якій із здорових фаз до повторного запалювання

$$u_n = U_{\phi} \sin(\tau + \psi) + U_{\text{см}};$$

після повторного запалювання та загасання перехідного процесу напруга на фазі досягає лінійної і дорівнює

$$u_{\text{уст}} = \sqrt{3} * U_{\phi} \sin(\tau + \psi + \frac{\pi}{6})$$

Момент повторного запалювання повинен бути обраний так, щоб $u_{\text{пер}}$, порхована за формулою (6.2), досягала максимального значення.

Пояснимо походження коефіцієнта $\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{\text{м}\phi}}$. Після запалювання дуги ємність b_{ϕ} ушкодженої фази є закороченою, а ємності b_{ϕ} здорових фаз з'єднуються паралельно з міжфазними ємностями $b_{\text{м}\phi}$ (рис. 6.3).

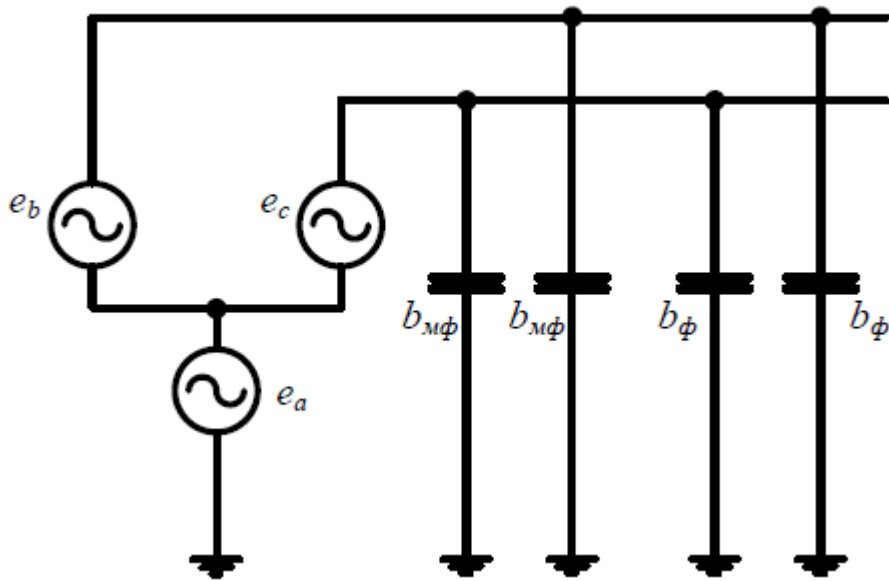


Рисунок 6.3 – Перетворення схеми рис. 6.1, що ілюструє зниження $u_{\text{пер}}$

При таких з'єднаннях відбувається перерозподіл вільного заряду між емностями і зниження напруги вільних коливань $u_e = u_n + u_{уст}$ відповідно до коефіцієнта $\frac{b_\phi}{b_\phi + b_{m\phi}}$. Значення коефіцієнта для ліній ≤ 35 кВ становить в середньому 0,75.

Коефіцієнт загасання $(1 - d)$ можна прийняти рівним 0,9.

На рис. 6.4 наведено криві напруг на одній із здорових фаз при величині $U_{зс} = -1,2 * U_\phi$. Максимальна перенапруга на здоровій фазі виникає при повторному запалюванні поблизу максимуму напруги $u_{уст}$; досить близьке значення ми одержимо, якщо для спрощення розрахунку приймемо, що повторне запалювання відбувається точно в момент максимуму $u_{уст}$. Тоді

$$u_{уст} = \sqrt{3} * U_\phi * \sin \frac{\pi}{2} = \sqrt{3} * U_\phi;$$

$$u_n = U_\phi * \sin \frac{2\pi}{3} + U_{зс} = U_\phi * \frac{\sqrt{3}}{2} - 1,2 * U_\phi = -0,34 * U_\phi$$

Прийmemo: $\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{m\phi}} = 0,75$ і $(1 - d) = 0,9$;

Тоді $U_{\text{пер}} = 1,73 + (1,73 + 0,34) * 0,75 * 0,9 = 3,13 U_{\phi}$.

Максимальні перенапруги виявляються порядку $(3,0 \div 3,2) U_{\phi}$.

Численні вимірювання, виконані за останні роки, показали, що вказані значення дійсно є граничними для перенапруг дугових замикань на землю. Досліди ставилися при горінні дуги як у повітрі, так і в маслі. Для виникнення максимальної перенапруги достатньо одного циклу «гасіння-запалювання». Причиною збільшення перенапруг до кінця горіння дуги є поступове зростання напруг запалювання внаслідок розтягування дуги. З ростом емнісного струму дуга стає більш стійкою, що веде до зниження імовірності виникнення високих перенапруг.

Короткочасні перенапруги порядку $3U_{\phi}$ безпечні для нормальної ізоляції на робочих напругах до 35 кВ включно. Але досить тривалі перенапруги можуть призвести до перекриття забрудненої ізоляції.

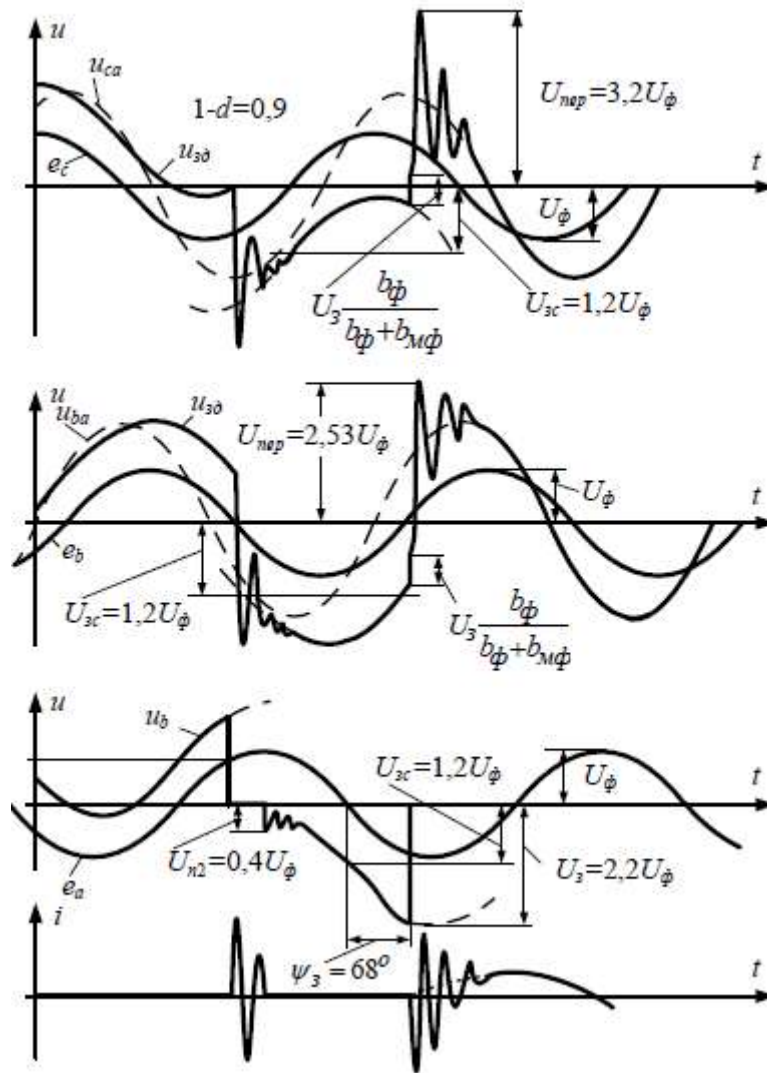


Рисунок 6.4 – Осцилограми розвитку перенапруг в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю

6.3 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю і обриві проводу

Істотне підвищення перенапруг відбувається при дуговому замиканні на землю, що супроводжується обривом фазного проводу (рис. 6.5,а). Такий обрив може бути наслідком теплової дії заземлювальної дуги. Причину зростання кратності перенапруг легко визначити з еквівалентної схеми на рис. 6.5,б.

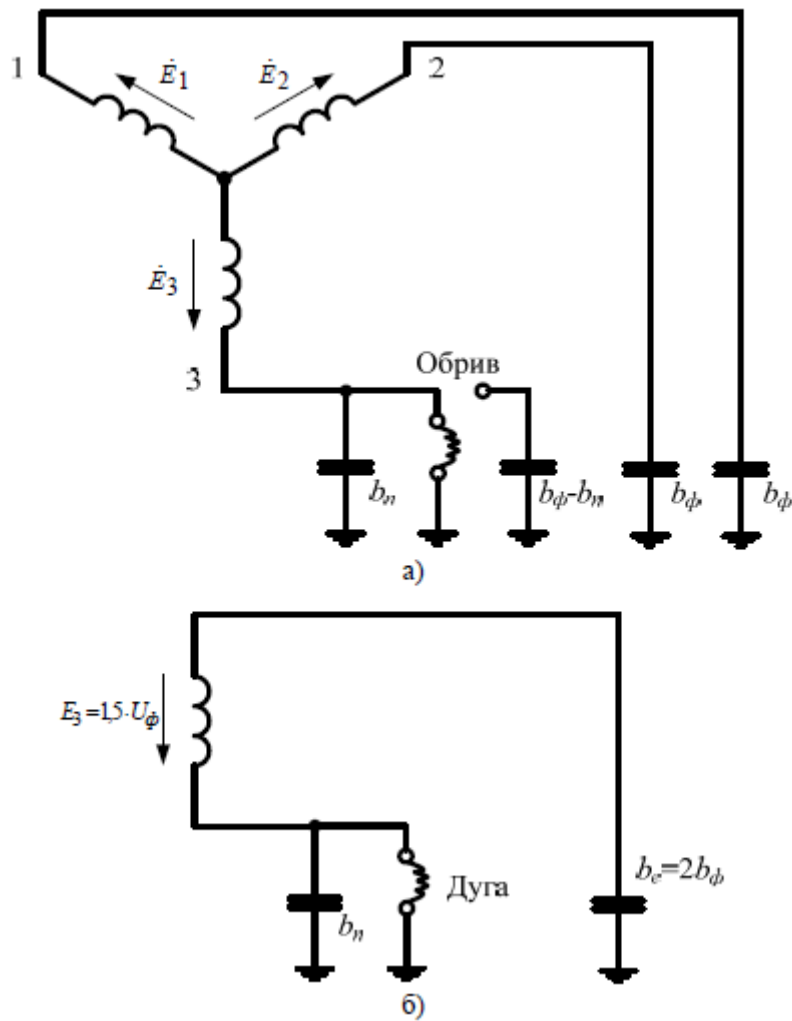


Рисунок 6.5 – Замикання на землю з обривом частини ємності пошкодженої фази: а – трифазна схема; б – розрахункова однофазна схема

Внаслідок обриву проводу ємність пошкодженої фази $b_n < b_{\phi}$. Міжфазна напруга $E_e = 1,5 \cdot U_{\phi}$ створює на проводах потенціали (напруги відносно землі), рівні $E_e \frac{b_e}{b_e + b_n}$ на пошкодженій фазі та $E_e \frac{b_n}{b_e + b_n}$ на здоровій фазі. Напруга зміщення нейтралі при згасанні дуги буде дорівнювати:

$$U_{зм} = E_e \frac{b_e}{b_e + b_n} + \frac{U_{п.г.}}{2}. \quad (6.3)$$

Порівняння (6.3) і (6.1) показує, що в розглянутому випадку напруга $U_{зм}$, а відповідно і можливі перенапруги, визначені (6.3), будуть вищі при більшому

співвідношенні $\frac{b_e}{b_e + b_n}$. При $b_n=0$ (втрата всієї ємності фази) $U_{зм} = 1,5 * U_{\phi} + \frac{U_{п.г.}}{2}$.

На рис. 6.6 побудовані в залежності максимальних перенапруг від відношення b_n/b_{ϕ} . Криві розраховані для трифазної мережі за формулами (6.2) і (6.3) за умови $U_{п.г.}=0,4*U_{\phi}$. Як видно з кривих, при малому b_n/b_{ϕ} , тобто при від'єднанні більшої частини ємності ушкодженої фази, можливі небезпечні для ізоляції перенапруги.

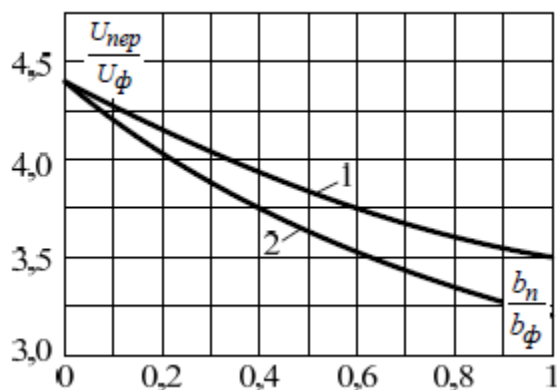


Рисунок 6.6 – Залежності перенапруг від відношення b_n / b_{ϕ} :

1 – за відсутності міжфазної ємності ($b_{i\delta} = 0$);

2 – за міжфазної ємності $b_{мф} = 1/3 * b_{\phi}$

6.4 Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасильною котушкою

Дугогасильна котушка гасить дугу однофазного замикання на землю і тим самим усуває причину розвитку перенапруг. Однак у тих випадках, коли замикання на землю супроводжується різким зниженням рівня ізоляції, наприклад, у випадках пробою або руйнування ізоляторів, падіння проводів на землю і т.д., дуга замикання на землю не гасне й може отримати нестійкий, перемежований характер з повторними гасіннями і запалюваннями. В цих випадках на ємностях мережі при черговому гасінні дуги можуть зберегтися залишкові заряди, що піднімають потенціал нейтралі до $U_{зс}$. Як і у випадку з ізольованою нейтраллю, перехід напруги на ушкодженій фазі від нульового значення до $U_{\phi} + U_{зс}$

відбувається шляхом коливання з високою частотою $\omega_0 \gg 1$ (рис. 6.7).

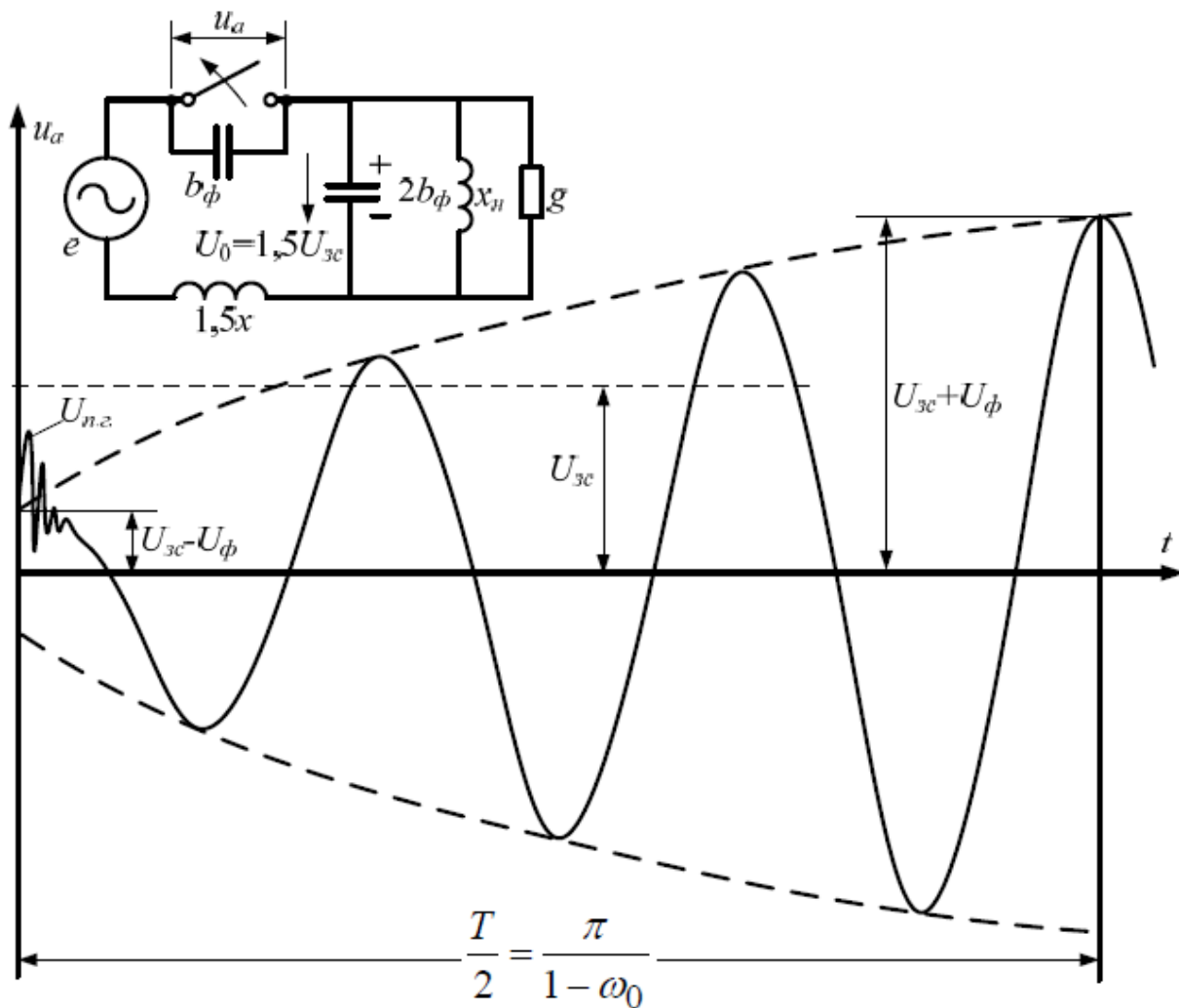


Рисунок 6.7 – Відновлення напруги на ушкодженій фазі при гасінні дуги в мережі з дугогасильною котушкою

Одночасно в контурі розвиваються коливання з низькою частотою

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3 * b_\phi * x_k}}$$

де x_k – індуктивний опір дугогасильної котушки.

Частота ω_0 близька до 1, що приводить до виникнення биття із частотою $(1 - \omega_0)$, як це показано на рис 6.7.

Через півперіод биття $\frac{T}{2} = \frac{\pi}{1-\omega_0}$ напруга на ушкодженій фазі стає рівною $U_{\phi} + U_{зс} * e^{-\delta \frac{T}{2}}$ аналогічно тому, як це мало місце і у випадку ізольованої нейтралі.

Якщо в цей (або близький до нього) момент відбудеться запалювання дуги на ушкодженій фазі, то перенапруги на здоровій фазі в результаті коливань, як і раніше, визначатимуться за формулою (6.2), де

$$u_{н} = U_{\phi} \sin(\tau + \psi) + U_{зс} * e^{-\delta \frac{T}{2}}. \quad (6.4)$$

З цього співвідношення видно, що можливі перенапруги тим нижчі, чим більше $\delta \frac{T}{2}$ – тобто, при заданому δ більше період биття T , або дугогасильна котушка менш налагоджена $\nu = 1 - \omega_0^2$.

Отже, покращення налагодження котушки призводить до зниження можливої кратності дугових перенапруг. З іншого боку, при великих розладах котушки можливі перенапруги, що не відрізняються за амплітудою від тих, які розвиваються при ізольованій нейтралі. У деякому відношенні котушка навіть може сприяти розвитку перенапруг. Внаслідок зростання відрізка часу від моменту згасання дуги до максимуму напруги на дузі зростає також інтервал часу деіонізації дуги і повторне замикання дуги стає вірогіднішим в найбільш несприятливий момент часу, відповідний максимуму $u_{пер}$.

7 Економічна частина

Комерціалізація вибору високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму класу напруги 800 кВ. Маркетинговий аналіз.

7.1 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. 7.1 – Опис ідеї стартап-проекту методів визначення захисних властивостей високовольтних обмежувачів перенапруг постійного струму

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди користувача</i>
Методика вибору нелінійних обмежувачів перенапруг для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ	1. Вибір основних електричних характеристик нелінійних обмежувачів перенапруг для захисту перетворювальних підстанцій постійного струму.	Можливість вибору ОПН за його основними електричними характеристиками
	2. Визначення дійсного значення витриманого статичного навантаження нелінійних обмежувачів перенапруг	Можливість вибору нелінійних обмежувачів перенапруг за його витримуваним механічними навантаженнями
	3. Розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покривки ОПН	Перевірка обраного ОПН для застосування на перетворювальних підстанціях постійного струму

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. 7.1) 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 для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ 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. 7. 2.

Таблиця 7.2 – 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 обмежувачів в перенапруг для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ	Визначення основних електричних характеристик та дійсного значення витримуваного статичного навантаження ОПН постійного струму	Відсутні попередні розробки. Існуючі розробки в інших країнах недоступні (приховані для одержання переваг – першості нових технологій).	Потреба в розробці нормативно-ї документації на державному рівні. Відсутні державні стандарти та рекомендації з вибору високовольтних ОПН постійного струму	Часткове використання існуючих методик для розрахунку електричних характеристик ОПН змінного струму	Широкий діапазон можливості застосовування 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 постійного струму класу напруги 800 кВ.

7.2 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 7.3 – Технологічна здійсненність ідеї вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<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 для передачі постійного струму класу напруги 800 кВ	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.

7.3 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 7.4 занесені результати проведеного аналізу попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.

Таблиця 7.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<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. 7.5).

Таблиця 7.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<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 постійного струму класу напруги 800 кВ	Електричні перетворювальні підстанції та вставки постійного струму для мереж класом напруги 800 кВ	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. 7.8).

Таблиця 7.6 – 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 7.7 – 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 7.8 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ

<i>№</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ 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. 7.8 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 покришки 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 для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ та факторів загроз і можливостей проведено SWOT-аналіз стартап-проекту, який наведено у табл. 7.9.

Таблиця 7.9 – 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 для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ є розрахунок провідності матеріалу ізоляційної покришки 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 постійного струму класу напруги 800 кВ 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>

Рекомендований час для виведення на ринок методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ у 2018-2019 роках.

Висновки до розділу

1. Оскільки попит на даний проект на ринку наявний, динаміка ринку зростає, можна зробити висновок щодо комерціалізації методу вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ – існують перспективи впровадження даної технології для огляду на бар'єри входження, потенційні групи клієнтів, стан конкуренції, конкурентоспроможність проекту.

2. За умов розроблення в Україні нормативно-правової бази відповідно до міжнародних стандартів можливе впровадження проекту вибір ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ, розроблення комп'ютерно-інтегрованої моделі для масової реалізації, а також єдиної системи стандартизації даного типу електричного обладнання.

3. Рекомендована комерціалізація методики вибору ОПН для ліній постійного струму класу напруги 800 кВ у 2019-2020 роках.

8 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

8.1 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.

8.2 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).

8.3 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.

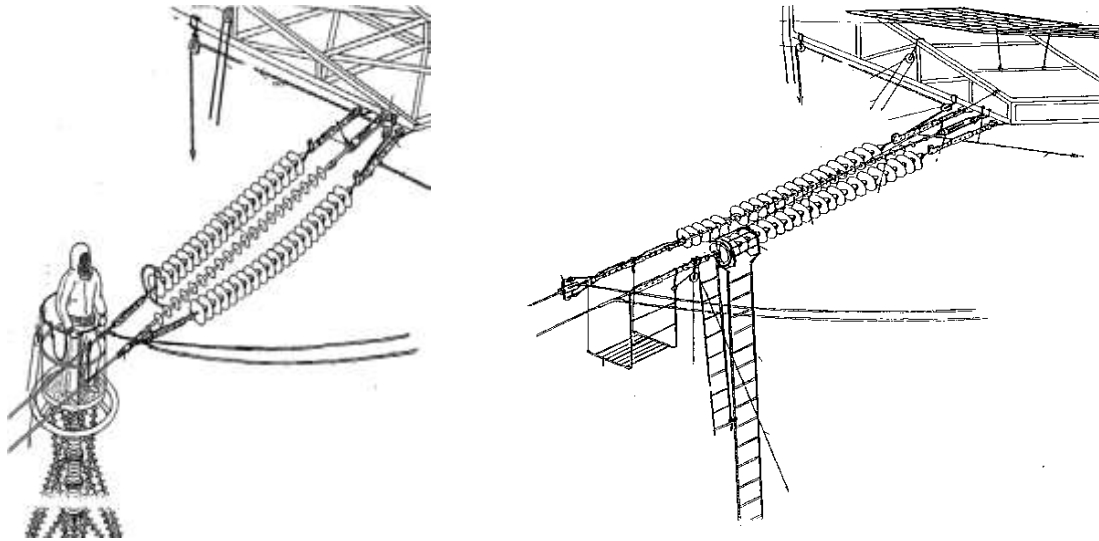
Підготовка робочої площадки полягає в розчищенні місця, де розстилають брезент, на який в певному порядку розкладають приладдя і інструмент. Ретельно перевіряють їх цілісність і відсутність дефектів, терміни випробування і придатність ізолювальних засобів. Перевіряють і надягають екрануючі комплекти 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 опору, 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. 5.1а), ізолювальної драбини (рис. 5.1б), підвісної kabіни (5.2а) та поворотної консолі (рис. 5.2б).



а)

б)

Рисунок 8.1 – 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

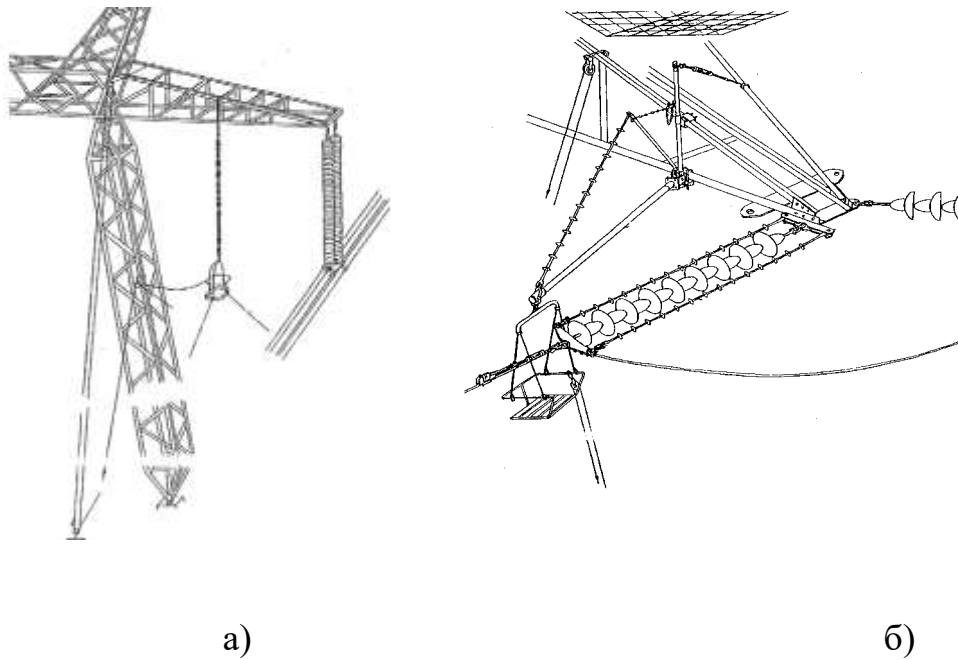


Рисунок 8.2 – Схеми доставки електромонтера до струмопровідних частин ПЛ у підвісному монтерському сидінні способом «маятника» (а) та за допомогою поворотної консолі (б)

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 поясих 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 електрики, які знаходяться на опорі, при випробуванні переміщалися до стояка, а електрики, що знаходяться на поверхні землі, відійшли від опори на 8–10 м, або використовували діелектричні боти. При по-яві 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 електро- мотерами із ремонту повітряних ліній електропередачі, за винятком вибіркових оглядів і оглядів ВЛ після капітального ремонту, які виконуються інженерно-технічними працівниками.

8.4 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 ;

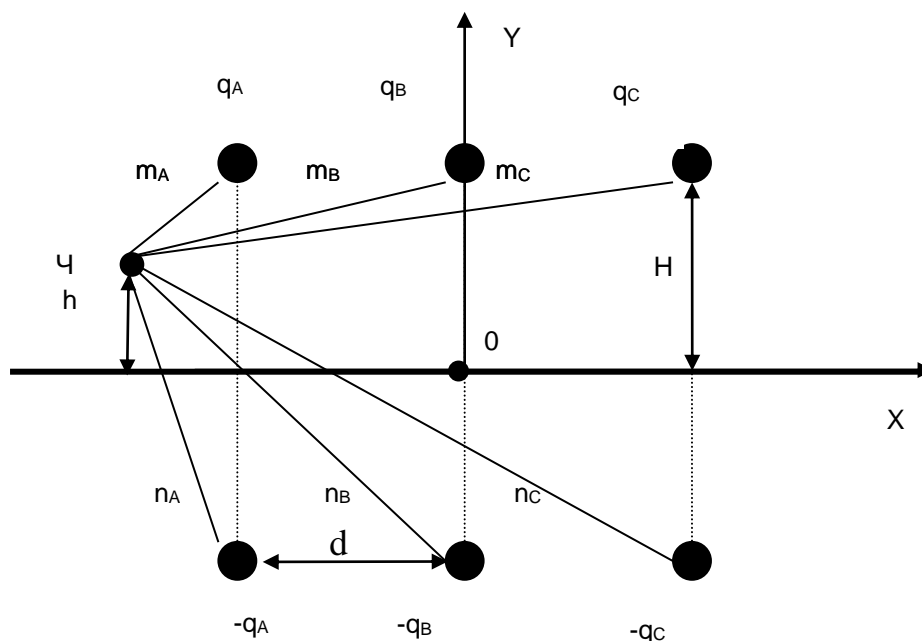
x - діапазон змінення відстаней на якій буде знаходитись людина ;

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:

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

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:

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

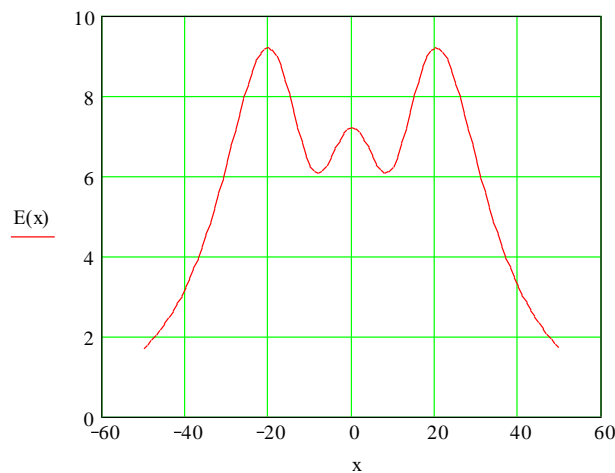
Змінюємо координату x в інтервалі від -50 до 50 метрів та повторюємо розрахунок.

Данні розрахунку наведені в додатку Б.

За одержаними даними будуюмо 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.

Розглянуто аналітичні методи для дослідження внутрішніх перенапруг, метод симетричних складових для розрахунку перенапруг, системи відносних одиниць при розрахунках внутрішніх 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 ізольованою нейтраллю та замиканні на землю і обриву проводу, а також перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасильною котушкою.

Найбільш універсальним захисним апаратом є ОПН, застосування якого можливо на лініях усіх класів напруги незалежно від способу заземлення нейтралі мережі.

ОПН може використовуватися в якості основного або додаткового засобу зниження числа грозових відключень ПЛ. Наприклад, ОПН 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.

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

Вольтамперна характеристика ОПН в рамках заданого класу напруги слабо впливає на ефективність роботи ОПН.

Для одноланцюгових ПЛ без троса установка ОПН 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 ОПН на опорі рекомендується:

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

Для багатоланцюгових ПЛ установка ОПН на опорі, як правило, рекомендується тільки в фази однієї з двох ланцюгів.

ОПН повинен приєднуватися до опори ПЛ 6-750 кВ без будь-яких іскрових проміжків через спеціальний пристрій, зване «універсальний відділювач» (УО). У мережах з глухозаземленою нейтраллю приєднання ОПН допустимо за допомогою звичайного «відділювача».

Також описані основні положення охорони праці з роботи людини на ПЛЕП, та розраховано напруженість електричного поля ЛЕП 750 кВ.

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., Ільєнко 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. Удода. – К. : Техника, 1988. – 200 с.

Додатки

Додаток Б Розрахунок в Інформаційно-діагностичному комплексі „Регіна”

Використовуючи програму аналізу інформаційно-діагностичного комплексу „Регіна” визначити запис АПВ фази „А” лінії 750 кВ „ПС-750 Вінницька (РПЗ30)”– „Козятин-330”.

Розрахувати:

1. 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:

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

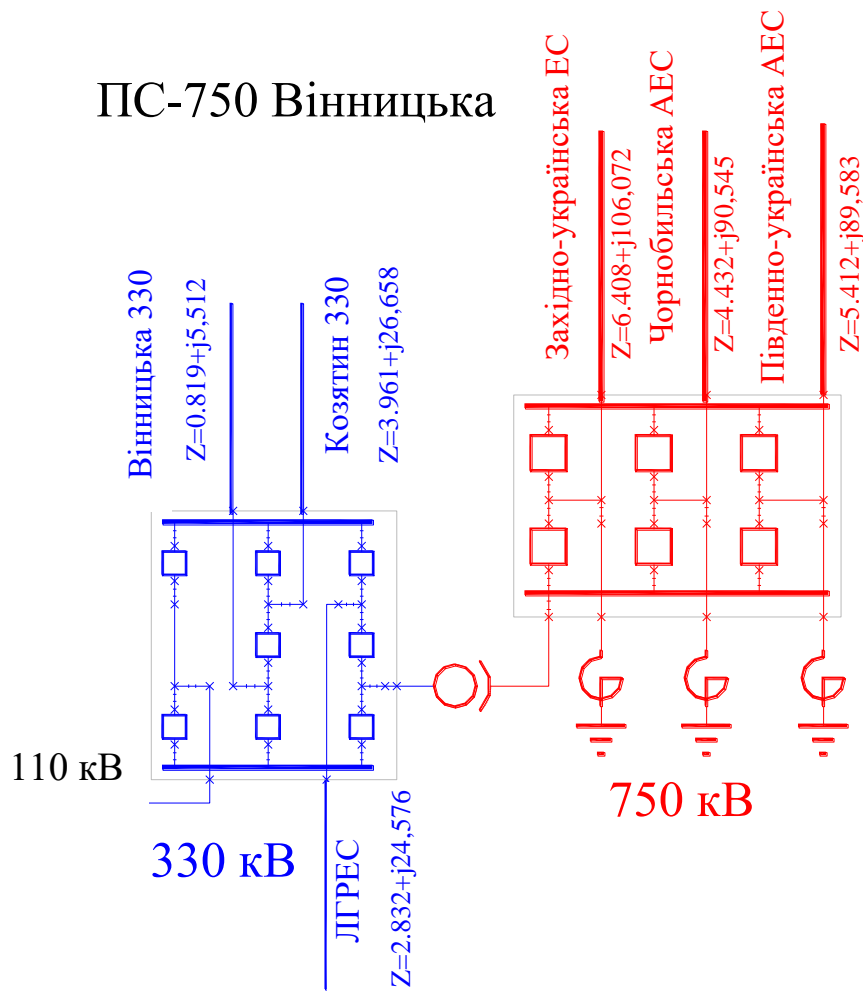


Рисунок Б.1 – Схема підстанції „Вінницька 750”

2. Визначити електричну довжину лінії користуючись виразом:

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

3. 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:

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

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

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

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

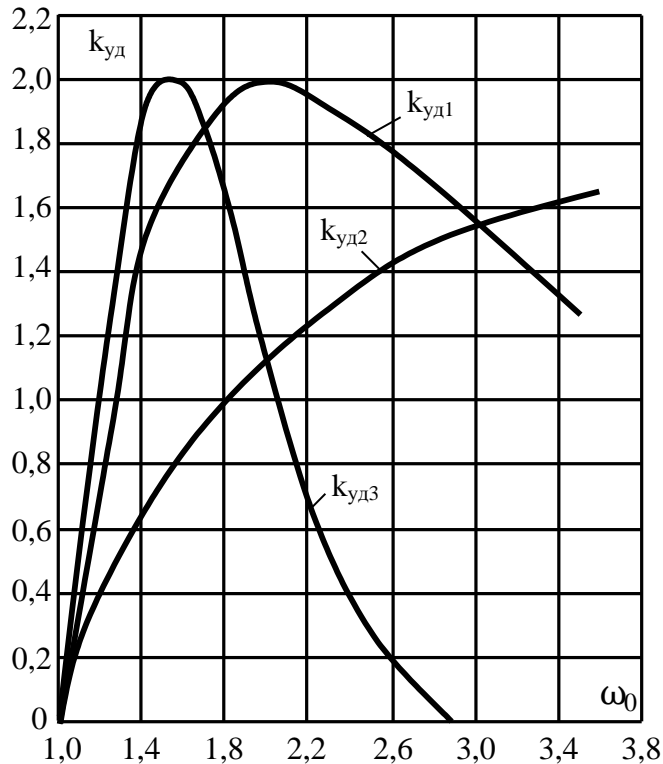


Рисунок Б.2 – Залежність ударних коефіцієнтів, що відповідають першим трьом максимумам напруги, від частоти власних коливань при $\delta = 0$.

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

7. Визначити ударний коефіцієнт комутаційної перенапруги з врахуванням втрат (коефіцієнту згасання) 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, $T = 2\pi / \omega_0$;

8. Рівень комутаційної перенапруги під час увімкнення лінії становить:

$$U_{пер} = E * k_C * k_{y\delta}$$

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

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

де τ – 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.

$$r := 3.961$$

$$\frac{x}{w} := 26.658$$

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

7.

$$T = 1 T$$

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

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

$$k_y = 0.829$$

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.

$$U_{vs} := 0.87$$

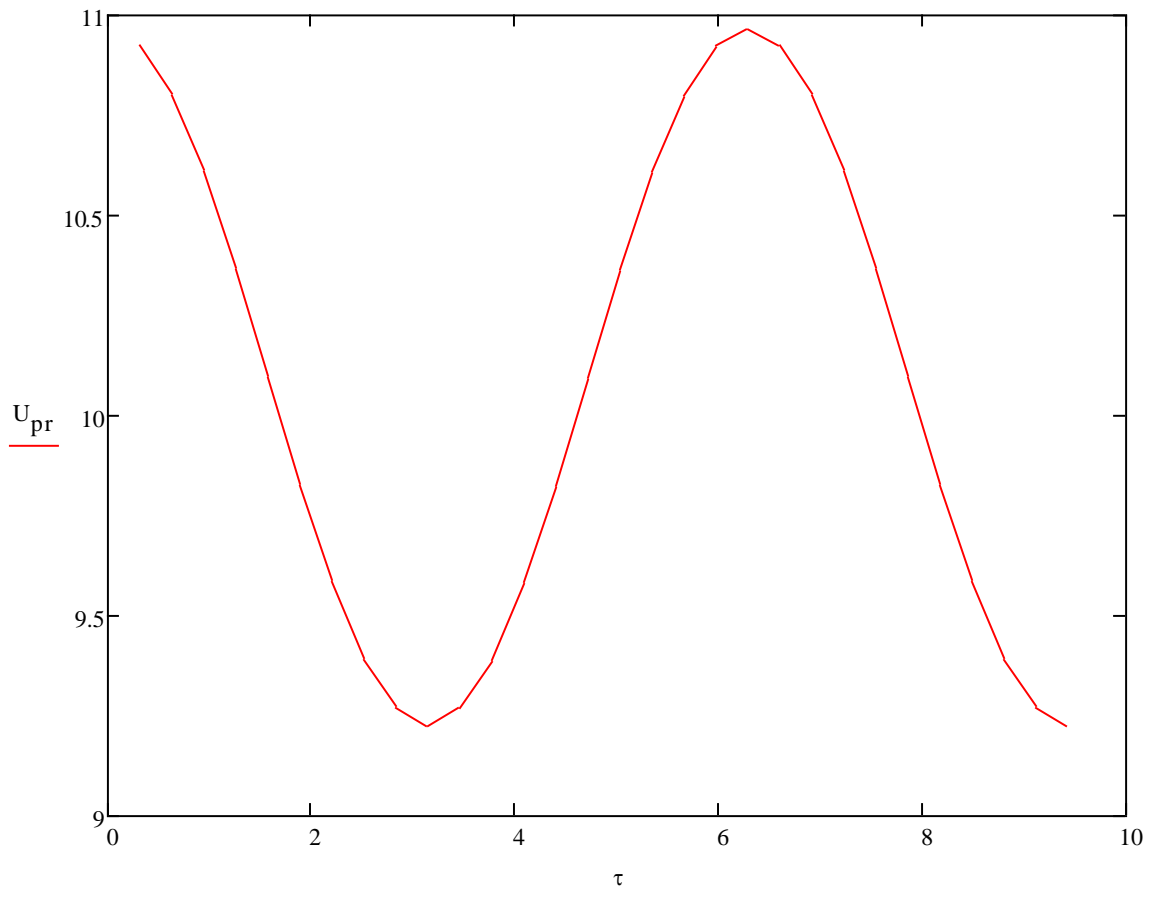
$$U_{pr} := U_{vs} \cdot \left[\cos(\tau) - e^{-\delta \cdot \tau} \cdot (\cos(w_0) \cdot \tau) \right]$$

$\tau :=$

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 В. 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

