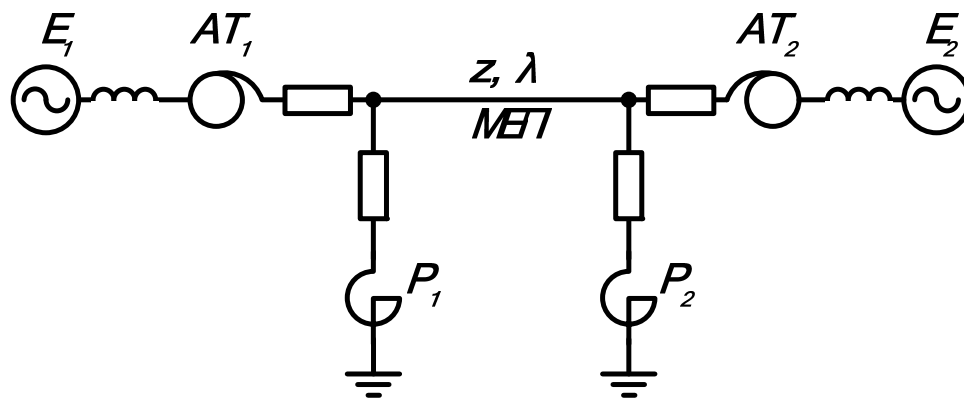


В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін

## ПЕРЕНАПРУГИ І БЛИСКАВКОЗАХИСТ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ



Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України  
Вінницький національний технічний університет

**В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін**

**ПЕРЕНАПРУГИ І БЛИСКАВКОЗАХИСТ  
В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ  
Навчальний посібник**

Вінниця  
ВНТУ  
2011

УДК 621.3.027.3 (07)

ББК 31.247.я73

C55

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 25.11.2010 р.)

Рецензенти:

**В. В. Кухарчук**, доктор технічних наук, професор

**П. Д. Лежнюк**, доктор технічних наук, професор

**П. В. Гель**, кандидат технічних наук, професор

**Собчук, В. С.**

C55 Перенапруги і блискавкозахист в електричних системах : навчальний посібник / В. С. Собчук, Н. В. Собчук, О. Б. Бурикін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 145 с.

В посібнику розглянуті комутаційні перенапруги в електричних системах в нормальних режимах малих навантажень і холостого ходу, в аварійних несиметричних режимах з комутаціями в циклах успішних та неуспішних автоматичних повторних включень. Аналіз блискавкозахисту наведено тільки для повітряних ліній та підстанцій. Посібник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей "Електричні станції" і "Електричні системи та мережі".

УДК 621.3.027.3 (07)

ББК 31.247.я73

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	5
Вступ.....	6
1 Захист ліній від блискавки .....	8
1.1 Статистичні характеристики параметрів блискавки .....	8
1.2 Задачі та критерії захисту ліній від блискавки .....	11
1.3 Число відключень повітряної лінії під час удару блискавки у фазні проводи.....	13
1.4 Число відключень ПЛ під час зворотних перекриттів з опори на лінію.....	19
1.5 Число відключень під час оборотного перекриття з троса на провід.....	28
1.6 Число відключень під час ударів блискавки поблизу лінії.....	31
1.7 Блискавкозахист ПЛ різних класів напруг .....	32
2 Блискавкозахист підстанцій.....	40
2.1 Завдання і критерії блискавкозахисту підстанції .....	40
2.2 Захист від прямих ударів блискавки .....	41
2.3 Захист підстанцій від хвиль, що набігають із лінії електропередачі .....	44
2.4. Блискавкозахист підстанцій різних класів напруги .....	55
2.5 Блискавкозахист електричних машин .....	60
3 Внутрішні перенапруги та їх обмеження .....	64
3.1 Аналітичні методи дослідження перенапруг .....	66
3.1.1 Системи відносних одиниць при розрахунках перенапруг в електричних системах.....	66
3.1.2 Перехідний процес в $r$ , $x$ , $b$ – коливальному контурі, прототипі досліджуваних електричних систем.....	68
3.1.3 Метод симетричних складових в розрахунках комутаційних перенапруг.....	71
3.1.4 Параметри розрахункових схем по каналах прямої і нульової послідовностей .....	73
3.2 Схеми заміщення ліній електропередачі .....	77
3.3 Підвищення напруги на здорових фазах при однофазних замиканнях .....	78
3.4 Основні складові внутрішніх перенапруг і їх розрахункові коефіцієнти.....	83
4 Експериментальні дослідження внутрішніх перенапруг в діючих мережах .....	85
4.1 Вимірювання внутрішніх перенапруг в діючих мережах. Інформаційно-діагностичний комплекс „Регіна” .....	85
4.2 Фізичні моделі для дослідження внутрішніх перенапруг.....	90
4.3 Розрахунок перехідних процесів на ПК.....	92

5	Комутаційні перенапруги в електричних системах.....	93
5.1	Перенапруги при включенні лінії.....	93
5.2	Перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями .....	98
5.3	Перенапруги під час повторного включення лінії.....	102
5.4	Відновлювальні напруги при відключенні коротких замикань .	104
5.5	Комутаційні перенапруги і відновлювальні напруги при розриві електричної передачі в асинхронному режимі.....	107
5.6	Особливості розвитку комутаційних перенапруг з урахуванням хвильових процесів по лініях .....	109
5.7	Перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів та реакторів .....	111
5.8	Ударний коефіцієнт при комутаціях .....	117
5.9	Міжфазні комутаційні перенапруги.....	119
5.10	Обмеження комутаційних перенапруг.....	120
5.10.1	Шунтувальні опори у вимикачах двоступеневої дії.....	120
5.10.2	Розрядники для обмеження комутаційних перенапруг .....	126
5.10.3	Вплив реакторів і трансформаторів напруги на розвиток комутаційних перенапруг.....	129
6.	Перенапруги при замиканнях на землю .....	133
6.1	Нестійке горіння заземлюючої дуги і розвиток перенапруг .....	133
6.2	Розвиток перенапруг при перемежованому дуговому замиканні на землю в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю ..	134
6.3	Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю і обриві проводу.....	139
6.4	Перенапруги при перемежованому дуговому замиканні на землю в мережі з дугогасильною котушкою.....	141
	ЛІТЕРАТУРА .....	143
	Словник найбільш вживаних термінів.....	144

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АПВ	–	автоматичне повторне ввімкнення
АРЗ	–	автоматичне регулювання збудження
ВН	–	висока напруга
ВРП	–	відкритий розподільний пристрій
ВСХ	–	вольт-секундна характеристика
ГЕС	–	гідроелектростанція
е.р.с.	–	електрорушійна сила
к.з.	–	коротке замикання
КНХ	–	крива небезпечних хвиль
ЛЕП	–	лінія електропередачі
НВН	–	надвисока напруга
НН	–	низька напруга
ОПН	–	обмежувач перенапруг нелінійний
ПВН	–	перехідна відновлювальна напруга
ПЛ	–	повітряна лінія
ПЛЕР	–	повітряна лінія електропередачі
ПУБ	–	прямий удар блискавки
ПУЕ	–	правила улаштування електроустановок
СН	–	середня напруга
РВ	–	розрядник вентильний
РВМГ	–	розрядник магнітовентильний
УВН	–	ультрависока напруга
ш.в.н.	–	швидкість відновлення напруги

## ВСТУП

У процесі роботи на ізоляцію (*primary insulation*) впливають різного роду напруги (*voltage*). По-перше, це довгострокові *робочі напруги*, величина яких близька до номінальної напруги (*nominal voltage, rated voltage*) або може незначно (на 10—15 %) перевищувати її. По-друге, на ізоляцію впливають *грозові*, або *атмосферні, перенапруги* (*overvoltage; over-voltage*). Ці перенапруги виникають у результаті удару блискавки (*lighting; bolt*) в електроустановку або поблизу неї. Джерелом грозових перенапруг (*lightning surge, lightning overvoltage*) є природна електрика грозових хмар, яка у вигляді блискавки уражає об'єкти на землі. Хвилі перенапруги, що виникають у струмоведучих частинах (*live part*) під час ударів блискавки, поширюються, проникаючи в обмотки трансформаторів (*transformer*), машин, впливаючи на ізоляцію ліній і апаратів (*electric apparatus*). Час впливу атмосферних перенапруг дуже малий (від одиниць до сотень мільйонних часток секунди), однак величина цих перенапруг за відсутності спеціальних заходів захисту може сягати мільйонів вольтів.

Третім видом напруг, що впливають на ізоляцію, є *внутрішні перенапруги* (*switching surge voltage; switching overvoltage; switching surge*), які виникають під час включення і відключення ліній і електроустаткування (*electrical equipment*), при аварійних і несиметричних режимах роботи, резонансних явищах (*resonance*). Джерелом внутрішніх перенапруг є е.р.с. (*electromotive force*) генераторів (*generator*) та електроенергія (*electric energy*) приєднаних до мережі реактивних елементів (*L, C*). Ці перенапруги впливають на ізоляцію порівняно короткочасно (від тисячних секунди до десятків секунд і більше), але величина їх  $U_{BH}$  може перевищувати номінальні напруги в кілька разів.

Чисельною характеристикою перенапруг є кратність (*overvoltage response ratio*), яка визначається з відношення максимальної напруги до найбільшої робочої напруги електрообладнання.

$$k_n = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{2} \cdot U_{\text{н.р.}}}$$

Іншими характеристиками перенапруг є повторюваність, довжина фронту (*wave front; shock front*), довжина імпульсу, кількість імпульсів, тривалість існування, охоплення мережі. Всі параметри

перенапруг мають випадковий характер і описуються статистичними величинами.

Для забезпечення безаварійної роботи ізоляція електричних установок повинна витримувати всі види напруг, які можуть на неї впливати, тобто мати певний рівень. Цей рівень значною мірою визначає габарити й вартість електроустаткування, тому його, якщо можна, прагнуть знизити.

До напруг 220 кВ включно рівень ізоляції визначається, в основному, атмосферними перенапругами, оскільки виявляється, що якщо ізоляція витримує імпульсні атмосферні перенапруги, вона, як правило, витримує і внутрішні перенапруги, можливі в установках цих класів напруг. Звідси випливає необхідність подальшого вдосконалювання блискавкозахисту й важливість імпульсних характеристик і випробувань для ізоляції електричних установок до 220 кВ.

Вдосконалення заходів блискавкозахисту привело до того, що за напруги 220 кВ і вище визначальну роль у виборі рівня ізоляції відіграють внутрішні перенапруги, що потребує спеціальних заходів для їх обмеження. Для того щоб габарити і вартість обладнання на напругу 330 кВ і вище були прийнятними, слід обмежувати внутрішні перенапруги до  $(2,2-1,8)U_{\phi}$  і нижче.

Таким чином, грамотне конструювання, виробництво й експлуатація високовольтних пристроїв вимагають глибокого знання методів зниження можливих перенапруг, електричних властивостей ізоляційних конструкцій, способів випробування й контролю ізоляції. Ці питання тісно зв'язані між собою та є змістом курсу “Техніка та електрофізика високих напруг”.



# 1 ЗАХИСТ ЛІНІЙ ВІД БЛИСКАВКИ

## 1.1 Статистичні характеристики параметрів блискавки

Типова форма імпульсу струму в ураженому блискавкою об'єкті наведена на рис. 1.1. З погляду блискавкозахисту головним параметром імпульсу струму блискавки  $i_{БЛ} = i_{БЛ}(t)$  є амплітуда струму блискавки  $I_{БЛ}$ , яку скорочено називатимемо просто струмом блискавки. Іншим параметром, що впливає на величину перенапруг в ураженому об'єкті, є крутизна струму блискавки, тобто швидкість наростання на фронті імпульсу  $di_{БЛ}/dt$ . Оскільки миттєві значення швидкості наростання струму в різних точках фронту різні, зазвичай під крутизною струму блискавки розуміють її середнє значення:  $I'_{БЛ} = I_{БЛ}/\tau_{\phi}$ . Тривалість фронту імпульсу  $\tau_{\phi}$ , прийнято визначати таким чином. На графіку імпульсу струму відзначають точки фронту, відповідні значенням струму  $0,1 \cdot I_{БЛ}$  і  $0,9 \cdot I_{БЛ}$ . Через ці точки проводять пряму до перетину з нульовим рівнем струму (віссю абсцис) і з рівнем амплітуди струму; інтервал часу  $\tau_{\phi}$  (рис. 1.1) називається тривалістю фронту.

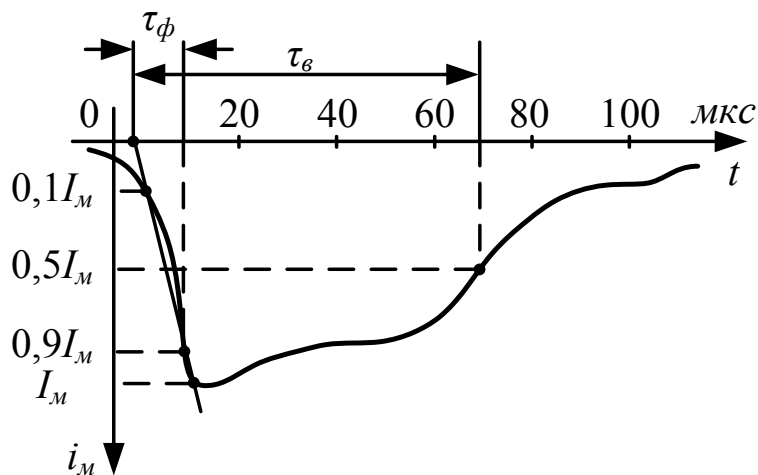


Рисунок 1.1 – Осцилограма струму блискавки

Після досягнення амплітуди імпульс струму блискавки відносно повільно спадає до нульового рівня. Довжину хвилі, або тривалість імпульсу струму блискавки прийнято оцінювати часом напівспаду  $\tau_{хв}$  (рис. 1.1), тобто інтервалом часу від умовного початку імпульсу до того моменту, коли крива, що пройшла через максимум імпульсу, знизиться до значення струму, рівного половині амплітуди. Згодом за першим імпульсом струму блискавки можуть виникати повторні імпульси. У наближених розрахунках використовуються усереднені розподіли  $I'_{БЛ}$  та  $I_{БЛ}$  без урахування їх відмінності під час першого і

подальших імпульсів. В цьому випадку статистичні розподіли можна апроксимувати експоненціальними функціями вигляду:

$$P(I_{БЛ}) = \exp(-0,04 \cdot I_{БЛ}); \quad P(I'_{БЛ}) = \exp(-0,08 \cdot I_{БЛ}), \quad (1.1)$$

де  $P(I_{БЛ})$  і  $P(I'_{БЛ})$  – імовірність того, що амплітуда (чи крутизна) під час одного удару блискавки перевищить задане значення.

Між амплітудою і крутизною струму блискавки спостерігається слабкий позитивний кореляційний зв'язок, тобто великим амплітудам струму, взагалі кажучи, відповідає і велика крутизна, і навпаки. Однак, в даний час, даних для отримання надійної кількісної оцінки цього зв'язку недостатньо. Зважаючи на слабкий статистичний зв'язок між  $I_{БЛ}$  та  $I'_{БЛ}$  в розрахунках часто вважають амплітуду і крутизну струму блискавки статистично незалежними випадковими величинами.

Довжина фронту  $\tau_f$  і довжина хвилі  $\tau_{хв}$  грозового розряду є випадковими величинами, причому їх статистичні розподіли також істотно розрізняються під час першого і повторних розрядів. Перші розряди характеризуються відносно великими довжинами фронту і великими довжинами хвиль в порівнянні з повторними розрядами.

Довжина фронту для першого розряду блискавки коливається в межах 2–10 мкс при середній величині 5 мкс. Для повторних розрядів вона істотно менша – в середньому 0,6 мкс.

Довжина хвилі у першого імпульсу блискавки складає 20–200 мкс при середній величині 75 мкс. У повторних імпульсів вона приблизно вдвічі менша: в середньому 32 мкс. Одноразові блискавки спостерігаються в 20% випадків, а у решті ударів число розрядів блискавки коливається від 2 до 10. В окремих випадках виділялись блискавки з числом розрядів понад 20.

Загальна тривалість багатократного розряду блискавки може досягати однієї секунди, але такі затяжні удари є рідкісним явищем. Велика частина ударів має тривалість не більше 0,3 с. Інтервали часу між повторними розрядами змінюються в межах від 0,01 до 0,5 с, в середньому вони складають 0,06 с.

Для розрахунків перенапруг в об'єктах, уражених блискавкою, необхідно прийняти еквівалентну схему (*equivalent circuit; substitution circuit*) каналу блискавки зі струмом, що стікає в об'єкт. Еквівалентний опір залежить від величини струму:

$$Z_{БЛ} = 140 \cdot (1 + 240 / I_{БЛ})$$

де  $Z_{БЛ}$  – еквівалентний опір, Ом;

$I_{БЛ}$  – ( $5 \leq I_{БЛ} \leq 300$  кА) величина струму блискавки, кА.

Найбільш об'єктивним показником інтенсивності грозової діяльності є число ударів блискавки на 1 км<sup>2</sup> земної поверхні за один грозовий сезон. Якщо відомо число грозових годин на рік, то за одну грозову годину в середньому відбувається 0,06–0,1 удару блискавки на 1 км<sup>2</sup> земної поверхні, а середня тривалість грози протягом грозового дня складає 1,5–2 грозових години. За цим припущенням середнє число ударів на 1 км<sup>2</sup> протягом року може бути визначене за формулою:

$$n=(0,06\dots0,1)\cdot T_G \text{ або } n=(0,09\dots0,15)\cdot T_D \quad (1.2)$$

де  $T_G$  і  $T_D$  – відповідно, середньорічне число грозових годин і днів.

Число прямих ударів блискавки (ПУБ) в наземні об'єкти можна визначити за формулою:

$$T_{ПУБ} = n \cdot S_p,$$

де  $S_p$  – розрахункова площа земної поверхні, з якої удари блискавки «стягуються» на об'єкт.

Для окремого зосередженого об'єкта висотою  $h$  середньорічне число прямих ударів блискавки може бути визначено за формулою:

$$N_{ПУБ} = \pi \cdot n \cdot r_{екв}^2, \quad (1.3)$$

де  $r_{екв} = 3,5 \cdot h$  – еквівалентний радіус площі, з якої розряди «стягуються» на об'єкт.

Ця формула приблизно описує залежність числа уражень об'єкта блискавкою від його висоти при  $h < 150$  м. Для великих висот число уражень об'єкта негативними низхідними блискавками зменшується, але швидко збільшується число уражень блискавками з висхідними лідерами, що мають інші характеристики.

Для відкритих розподільних пристроїв високовольтних підстанцій та інших наземних об'єктів розрахункове число ударів блискавки протягом року, відповідно до Керівних вказівок із захисту електростанцій і підстанцій 3–500 кВ від прямих ударів блискавки, обчислюється за формулою:

$$N_{ПУБ} = n \cdot S_p = n \cdot (l + 7 \cdot h)(b + 7 \cdot h) \cdot 10^{-6},$$

де  $h$  – висота блискавковідводів (або об'єкта, якщо блискавковідводи відсутні);

$l$  і  $b$  – довжина і ширина території підстанції, м.

Для протяжних об'єктів (ліній електропередач) прийнято оцінювати число прямих ударів блискавки на 100 км довжини і на 100 грозових годин  $N_{ПУБ}^*$ . Використовуючи формулу (1.2) і приймаючи ширину смуги, з якої блискавка «стягується» на частини ліній, рівною  $7 \cdot h_{cp}$  ( $h_{cp}$  – середня висота лінії в метрах), отримаємо:

$$N_{ПУБ}^* = (4 \dots 6) \cdot h_{cp}, \quad h_{cp} = h_{on} - 2f/3, \quad (1.4)$$

де  $h_{on}$  – висота підвісу троса чи верхніх проводів на опорі, м;  
 $f$  – стріла провісу, м.

Для ліній з високими опорами ( $h > 30$  м) можна застосовувати формулу, враховуючи більш швидке, в порівнянні з лінійною залежністю, збільшення числа ударів блискавки зі зростанням висоти лінії  $h_{cp}$ :

$$N_{ПУБ}^* = 5 \cdot h_{cp} + h_{cp}^2 / 30 + b, \quad (1.5)$$

де  $b$  – відстань між тросами або верхніми фазними проводами (при відсутності тросів).

## 1.2 Задачі та критерії захисту ліній від блискавки

Розрахунки за формулами (1.4) і (1.5) показують, що повітряні лінії щорічно вражаються десятками прямих ударів блискавки на 100 км за 100 грозових годин. Головною небезпекою для лінії є прямий удар блискавки у фазні проводи з подальшим перекриттям ізоляції (*flashover*) від перенапруг, що виникають при цьому. Після закінчення імпульсу струму блискавки на місці перекриття залишається провідний канал з газом, який не встиг деіонізуватися (*deionization*), по якому під дією робочої напруги може продовжувати протікати струм промислової частоти (*frequency; rate*). В процесі ліквідації замикань на лінії, викликаних грозою, витрачається ресурс роботи вимикачів (*circuit breaker*); трансформатори та інше устаткування мережі піддаються електродинамічним і термічним діям струмів (*short-circuit current*) короткого замикання (*short circuit*). Значна частина замикань супроводжується подальшим розвитком аварії, що вимагає відключення лінії на тривалий термін з порушенням нормального електропостачання споживачів.

Ймовірність грозового відключення лінії залежить від багатьох причин: інтенсивності грозової діяльності в районах, розташованих уздовж траси лінії, номінальної напруги мережі, її конструкції, матеріалу опор і т.д. З підвищенням класу напруги лінії, як правило, збільшуються її довжина, висота опор, а отже, і ймовірність ураження

лінії блискавкою, тому на лініях електропередачі вищих класів напруги, які виконуються на металевих і залізобетонних опорах, зазвичай підвішують блискавкозахисні троси з малим кутом захисту, що забезпечує малу ймовірність ураження блискавкою фазних проводів лінії, а достатньо малий імпульсний опір заземлення опор знижує ймовірність зворотного перекриття з опори на провід під час удару блискавки в опору або трос поблизу опори (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Класифікація задач блискавкозахисту ліній електропередач

У ряді випадків лінії електропередачі виконуються на дерев'яних опорах. Блискавкозахисний трос на таких лініях не підвішується, тому майже всі удари блискавки в лінію потрапляють у фазні проводи. При цьому необхідний рівень блискавкозахисту лінії забезпечується малою вірогідністю переходу імпульсного перекриття міжфазної ізоляції в силову дугу (*arc-over*), що пов'язано з високою швидкістю відновлення електричної міцності проміжку.

На лініях середніх класів напруги 6–35 кВ, які працюють в системі з ізольованою нейтраллю, часто використовуються металеві або залізобетонні опори. Застосування блискавкозахисних тросів на таких лініях недоцільно, оскільки внаслідок малої електричної міцності ізоляції лінії практично будь-який удар блискавки в трос приводить до зворотного перекриття з троса на провід. Тому найбільш ефективними заходами, які забезпечують грозостійкість таких ліній, можна вважати застосування автоматичного повторного включення лінії (цей захід є резервним для ліній електропередач вищих класів напруги) і дугогасильної котушки, що зменшують струм дуги

однофазного замикання на землю і збільшують ймовірність самовільного згасання дуги.

Для порівняння ефективності різних заходів блискавкозахисту лінії електропередачі застосовується ряд критеріїв.

**Рівень грозостійкості.** Під «рівнем грозостійкості» розуміють той найбільший розрахунковий струм  $I_{БЛ}$  в добре заземленому об'єкті, який виникає внаслідок прямого удару блискавки типової форми (наприклад, косокутна хвиля з фронтом  $\tau_f = 2$  мкс), при якому ще не перебивається ізоляція лінії. За зміною рівня грозостійкості можна оцінити вплив окремого параметра схеми (наприклад, опір заземлення опори) на грозостійкість лінії.

**Крива небезпечних струмів блискавки.** Під час удару блискавки у вершину опори або в трос поблизу опори необхідно враховувати не один параметр, а декілька, наприклад, опір заземлення опори і її індуктивність. При цьому напруження на гірлянді ізоляторів (*insulating string; catenary*) залежатиме не тільки від амплітуди  $I_{БЛ}$ , але й від крутизни  $I'_{БЛ}$  струму блискавки. Зв'язок між небезпечними поєднаннями  $I_{БЛ}$  та  $I'_{БЛ}$  відображається кривими небезпечних струмів. Ця залежність, на відміну від рівня грозостійкості, дозволяє оцінити вплив не однієї, а двох характеристик лінії (наприклад, опору заземлення та індуктивності опори) на надійність блискавкозахисту.

**Показник надійності блискавкозахисту.** За допомогою показника надійності блискавкозахисту можна отримати наближену оцінку числа років безаварійної роботи  $\tau$ , тобто величину, обернену математичному очікуванню числа відключень лінії в рік –  $n_{\Sigma} = 1/\tau$ . Показник  $n_{\Sigma}$  дозволяє порівнювати ефективність різних блискавкозахисних заходів і схем (наприклад, грозостійкість різних типів ліній на різних опорах, з тросами і без тросів, вплив ефективності автоматичних повторних ввімкнень (АПВ (*autoreclosing*)) і т. д.).

### 1.3 Число відключень повітряної лінії під час удару блискавки у фазні проводи

Ефективність блискавкозахисту визначають окремо для таких розрахункових випадків ураження лінії (рис. 1.3 і 1.4):

- 1) удар блискавки в провід з подальшим перекриттям з проводу на опору або між проводами;
- 2) удар блискавки у вершину опори з подальшим перекриттям з опори на провід;
- 3) удар блискавки в трос з подальшим перекриттям з троса на провід або на землю;

4) удар блискавки поблизу лінії електропередачі, що супроводжується появою перекриття внаслідок індукованих перенапруг.

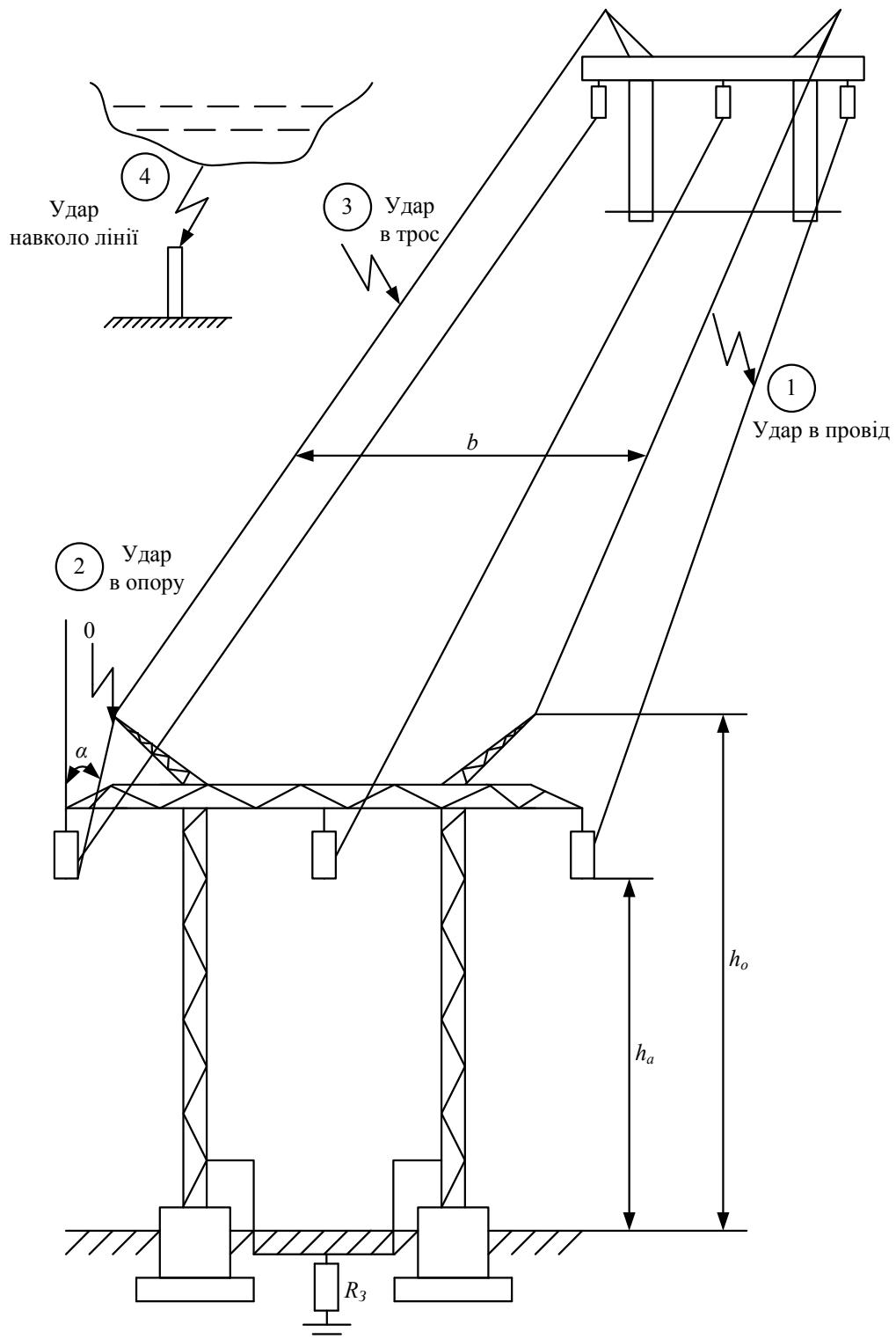


Рисунок 1.3 – Розрахункові випадки ураження лінії з тросами блискавкою

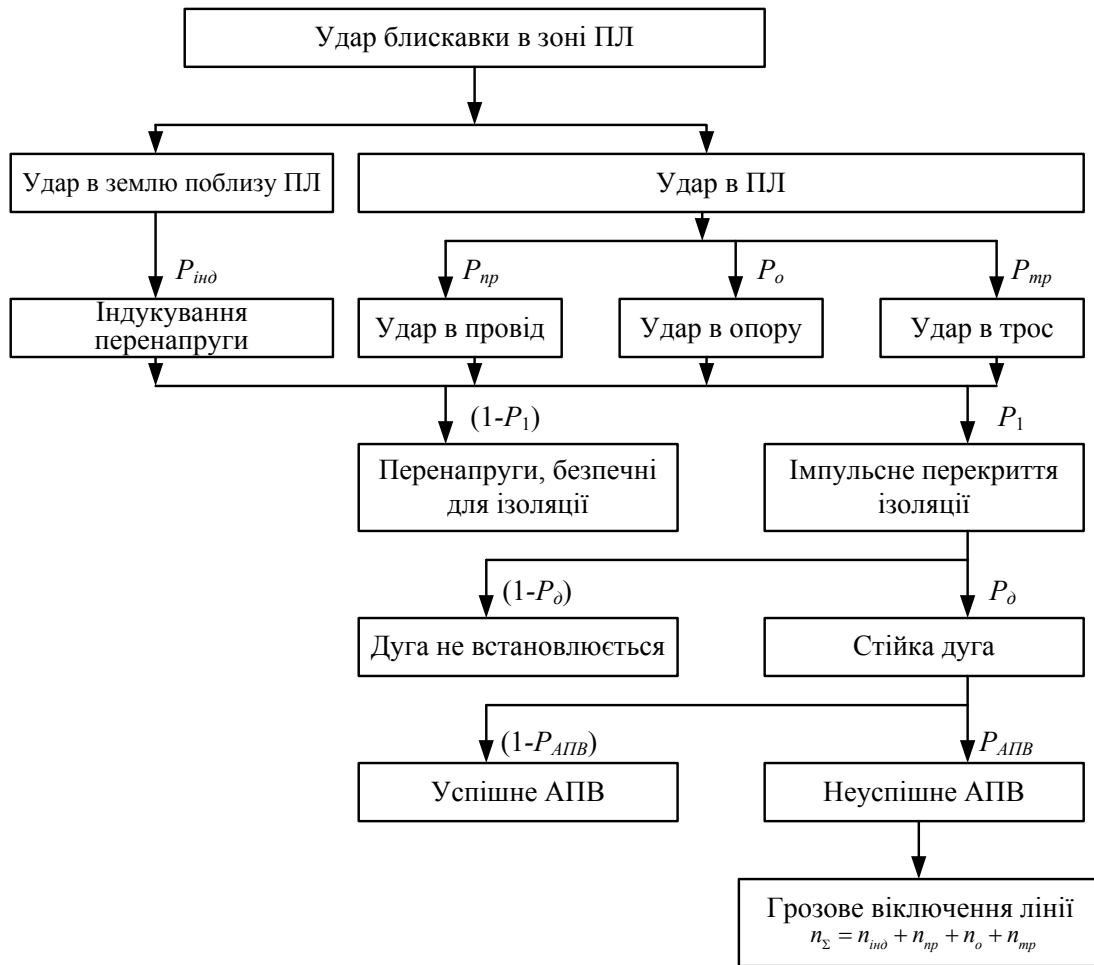


Рисунок 1.4 – Логічна схема розвитку грозових аварій ПЛ 110 кВ і вище

Можна визначити сумарне число грозових відключень в рік за формулою:

$$n_{\Sigma} = n_{np} + n_o + n_{tr} + n_{ind}, \quad (1.6)$$

де  $n_{np}$ ,  $n_o$ ,  $n_{tr}$  – число відключень при ударах блискавки в провід, в опору і трос;

$n_{ind}$  – число відключень внаслідок індуктивних перенапруг.

Число відключень лінії під час удару блискавки в провід:

$$n_{np} = N_{ПУБ} P_{np} P_{1np} P_d (1 - P_{АПВ}), \quad (1.7)$$

де  $N_{ПУБ}$  – число прямих ударів блискавки в лінію (проводи, троси, опори);

$P_{np}$  – імовірність прориву блискавки на фазні проводи поза троси (при відсутності тросів  $P_{np} = 1$ );



$P_{1np}$  – імовірність перекриття гірлянди під час удару блискавки в провід;

$P_0$  – імовірність виникнення дуги під час перекриття;

$P_{ABП}$  – ймовірність успішної роботи АПВ.

Число прямих ударів блискавки в лінію:

$$N_{ПУБ} = N_{ПУБ}^* \cdot l/100 \cdot T_q/100, \quad (1.8)$$

де  $N_{ПУБ}^*$  – залишкове число ударів блискавки на 100 км довжини лінії і 100 грозових годин.

Для оцінювання числа перекриттів важливе значення має визначення імовірності прориву блискавки на провід, обійшовши троси. Для ліній надвисоких (НВН) та ультрависоких (УВН) напруг, де висока робоча напруга вже помітно розширює «зону захоплення» блискавки проводом, ця імовірність має визначальне значення. Досвід експлуатації ліній НВН показав, що зі збільшенням робочої напруги при куті тросового захисту  $\alpha > 0$  помітно збільшується імовірність прориву блискавки на фазні проводи, заряд яких «притягує» блискавку до проводів. Аналіз досвіду експлуатації дозволяє запропонувати наведену нижче емпіричну формулу для визначення імовірності прориву блискавки на фазні проводи, минаючи троси:

$$P_{np} = \exp \left[ \frac{1}{D} \left( \frac{0.55}{\Delta h} \sqrt{\alpha \cdot h_{mp} \cdot \Delta S} - \frac{9}{D} \right) \right], \quad (1.9)$$

де

$$D = 1 + U_n \frac{h_{mp}}{\Delta h} \left( \frac{U_n^2 \cdot 117}{\Delta h \cdot \Delta S \cdot \ln \frac{2h_{np}}{r_{np}}} \right);$$

$\alpha$  – кут тросового захисту, в градусах;

$h_{mp}$  і  $h_{np}$  – висота підвісу троса і проводу;

$\Delta h$  – перевищення троса над проводом;

$\Delta S$  – горизонтальне зміщення троса відносно проводу;

$r_{np}$  – радіус проводу;

$U_n$  – номінальна напруга лінії в мегавольтах.

Перехід до від'ємних захисних кутів  $\alpha < 0$  за рахунок зсуву тросів за межі розташування проводів істотно зменшує ймовірність прориву блискавки на крайні фазні проводи. Проте слід зважати на можливість прориву блискавки зверху на середній фазний провід НВН.

Розглянемо методику визначення ймовірності перекриття гірлянди під час проривів блискавки  $P_{1np}$ . В цьому випадку по фазних проводах від місця прориву зі швидкістю світла розповсюджуються хвилі перенапруг. Для визначення максимальної напруги на ізоляції використовуємо розрахункову схему (рис. 1.5, а), де позначено:  $Z_{x\phi}$  – хвильовий опір фазного проводу з урахуванням корони;  $Z_{БЛ}$  – еквівалентний опір каналу блискавки.

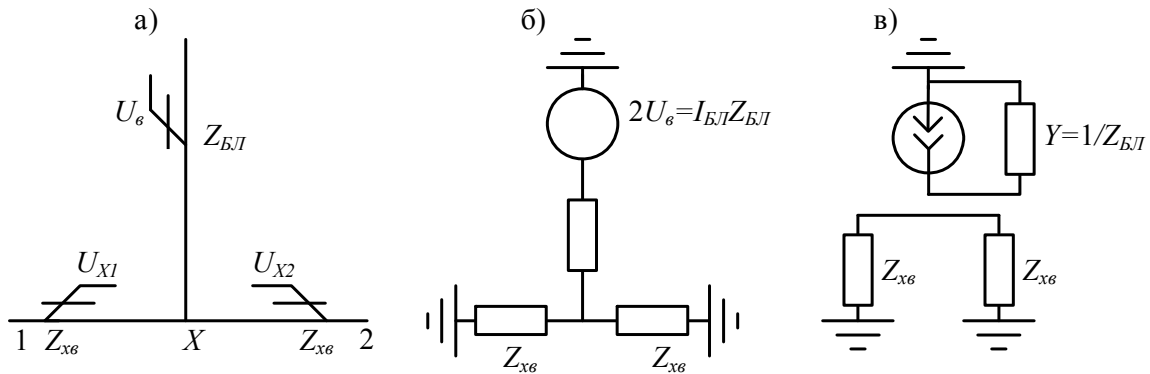


Рисунок 1.5 – Еквівалентна схема для розрахунку величини напруги на проводі в разі прориву блискавки через тросовий захист

Хвильовий опір одиночного тросу або проводу визначається за формулою:

$$Z_{\phi} = k \cdot 60 \cdot \ln(2h_{cp} / r),$$

де  $k=0,9$  – коефіцієнт, який враховує вплив імпульсної корони;  
 $h_{cp}$  – середня висота троса чи проводу над землею, м;  
 $r$  – радіус троса чи проводу, м;

$$r_{екв} = \sqrt[n]{n \cdot r_1 \cdot r_{np}^{n-1}},$$

де  $n$  – число складових розщепленого проводу;  
 $r_1$  – радіус однієї складової, м;  
 $r_{np}$  – радіус кола, проведеного через центр складових, м.

Заміщуючи лінії, що відходять від вузла  $X$  за правилом еквівалентної хвилі, для розрахунку напруги в точці удару блискавки, отримаємо еквівалентну схему (рис. 1.5,б,в), згідно з якою:

$$U_X = I_{БЛ} \cdot Z_E, \quad (1.10)$$

де  $I_{БЛ}$  - розрахунковий струм блискавки під час удару в добре заземлений об'єкт ;

$$Z_E = \frac{Z_{БЛ} \cdot Z_{xв} / 2}{Z_{БЛ} + Z_{xв} / 2} - \text{еквівалентний вхідний опір в точці удару}$$

блискавки.

Напруга хвилі, яка розповсюджується в обидві сторони від місця удару блискавки, рівна напрузі в точці  $X$ :  $U_{X1} = U_{X2} = U_X$ . Досягнувши опори ЛЕП (*overhead line*), ця хвиля наруги діє на гірлянди ізоляторів, створюючи небезпеку їх перекриття. Впливом робочої напруги, коли ймовірність перекриття рівна одиниці, можна нехтувати. Полярність цієї напруги з рівною імовірністю або така сама, або протилежна полярності хвилі. Рівень грозостійкості лінії під час ураження блискавкою фазного проводу згідно з (1.10) можна розрахувати за формулою:

$$I_{БЛнр} = U_{имн\ min} / Z_E,$$

де  $U_{имн\ min}$  – мінімальна імпульсна напруга перекриття фазної ізоляції для повної хвилі.

Для виявлення можливості перекриття між проводами фаз різниця напруг на лінійній ізоляції визначається таким чином:

$$U_{із} = I_{БЛ} Z_E (1 - k_{12}),$$

де  $k_{12}$  – коефіцієнт зв'язку між паралельними та ураженими проводами з врахуванням імпульсної корони.

Рівень блискавкозахисту для перекриття лінійної ізоляції рівний:

$$I_{БЛнр} = U_{із} / [(1 - k_{12}) Z_E] = U_{имн\ min} / [(1 - k_{12}) Z_E].$$

Аналіз досвіду експлуатації показує, що ймовірність встановлення силової дуги  $P_\delta$  в першому наближенні залежить від градієнта робочої напруги уздовж шляху перекриття, її можна оцінити за формулою:

$$P_\delta \approx 1,6 U_{роб} / l_{нр} - 0,06, \quad (1.11)$$

де  $l_{нр}$  – сумарна довжина шляху імпульсного перекриття, см;

$U_{роб}$  – ефективне значення робочої напруги уздовж шляху перекриття, кВ.

Обчислену імовірність встановлення дуги приймають рівною 0,1, якщо згідно з розрахунком за формулою (1.11) вона менша, ніж це значення. Якщо за розрахунком  $P_{\partial}$  більша одиниці, її приймають рівною 1,0. Таким чином, область імовірності  $P_{\partial}$  обмежується інтервалом  $0,1 < P_{\partial} < 1,0$ . Як показує досвід експлуатації, середні значення імовірності  $P_{\partial}$  для ліній різних класів напруги складають 0,5 в мережах 6–35 кВ і 0,7–0,8 в мережах 110–750 кВ.

Слід мати на увазі, що наведені значення  $P_{\partial}$  є усередненими і їх відносять до всіх видів відключень лінії (у тому числі і грозових).

#### **1.4 Число відключень ПЛ під час зворотних перекриттів з опори на лінію**

Число відключень внаслідок зворотних перекриттів під час ударів блискавки у вершину опори рівне:

$$n_o = N_{ПУБ} P_{on} P_{1on} P_{\partial} (1 - P_{АПВ}), \quad (1.12)$$

де  $P_{on}$  – імовірність попадання блискавки в опору або трос поблизу опори;

$P_{1on}$  – імовірність зворотних перекриттів під час ударів блискавки у вершину опори (тобто імовірність таких параметрів грозового розряду, за яких напруга на ізоляції перевищить її імпульсну електричну ізоляцію).

Методика визначення решти параметрів, що входять в (1.12), ( $N_{ПУБ}, P_{\partial}$ ) розглянута вище [див. формули (1.8) і (1.11)].

Імовірність попадання блискавки в опору або в трос поблизу опори під час ураження блискавкою лінії може бути наближено визначена

$$P_{on} \approx 4h_o / l_{np},$$

де  $h_o$  – висота опори (висота підвісу троса);

$l_{np}$  – довжина прогону.

Зворотне перекриття гірлянди ізоляторів може виникнути, якщо з'явилась напруга  $U_{iz}$  на гірлянді, яка досягне або перевищить її імпульсний рівень.

Напруга на гірлянді рівна різниці напруги на опорі і на проводі. Під час удару блискавки в металеву заземлену опору спочатку майже

весь струм блискавки спрямовується в землю через тіло опори і її заземлення (*lightning protection earth*). Строго кажучи, опора і заземлювач є ділянками неоднорідної лінії, в яких розповсюджуються прямі і відбиті хвилі між вершиною ураженої опори і землею. Проте коли  $\tau_{\phi} > h_o/c$ , де  $c$  – швидкість світла, достатня точність розрахунків забезпечується заміщенням опори зосередженою індуктивністю:

$$L_o = L_o^* h_o,$$

де  $L_o^*$  – усереднена індуктивність на одиницю висоти опори. Для наближених розрахунків можна прийняти  $L_o^* = 0,5 - 0,7$  мкГн/м.

Заземлювач при цьому враховується імпульсним активним опором  $R_{zi}$  і індуктивністю  $L_{zi}$ . Для зосереджених заземлювачів можна нехтувати індуктивністю  $L_{zi}$  в порівнянні з індуктивністю опори.

Струм, що протікає по опорі в землю, може бути приблизно оцінений за еквівалентною схемою рис. 1.6. Він виявляється меншим, ніж струм блискавки  $I_{БЛ}$  за рахунок відгалуження в троси, що відходять від опори, і віддзеркалення хвилі струму в канал блискавки:

$$I_{on} = \chi I_{БЛ}.$$

Коефіцієнт відгалуження струму блискавки в опору  $\chi$  на інтервалі часі від початку фронту хвилі до повернення по тросах хвиль, віддзеркалених від сусідніх опор, визначається за еквівалентною схемою рис. 1.6:

$$\chi = \frac{Z_{БЛ} (R_{zi} \parallel Z_{mp}/2)}{[Z_{БЛ} + (R_{zi} \parallel Z_{mp}/2)] R_{zi}} = \frac{Z_{БЛ} \parallel Z_{mp}/2 \parallel R_{zi}}{R_{zi}}, \quad (1.13)$$

де  $\parallel$  – знак паралельного додавання,  $Z_1 \parallel Z_2 = Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ . Зазвичай коефіцієнт  $\chi$  дорівнює 0,8–0,95.

Якщо прийняти форму імпульсу струму блискавки косокутною  $i_{БЛ} = i_{БЛ}(t) = I'_{БЛ} t$ , то в межах фронту хвилі напруга в точці 1 (рис. 1.7), для  $t \gg h_o/c$ , виявляється пов'язаною з миттєвим значенням струму і його крутизною таким чином:

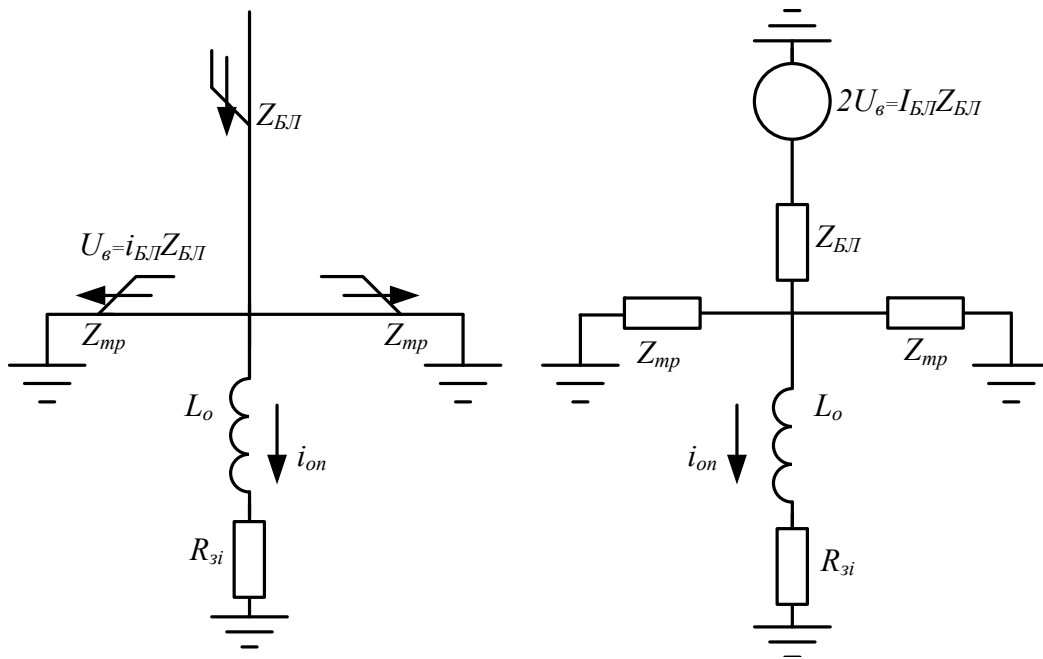


Рисунок 1.6 – Еквівалентна схема для розрахунку величини струму в опорі під час удару блискавки у вершину опори

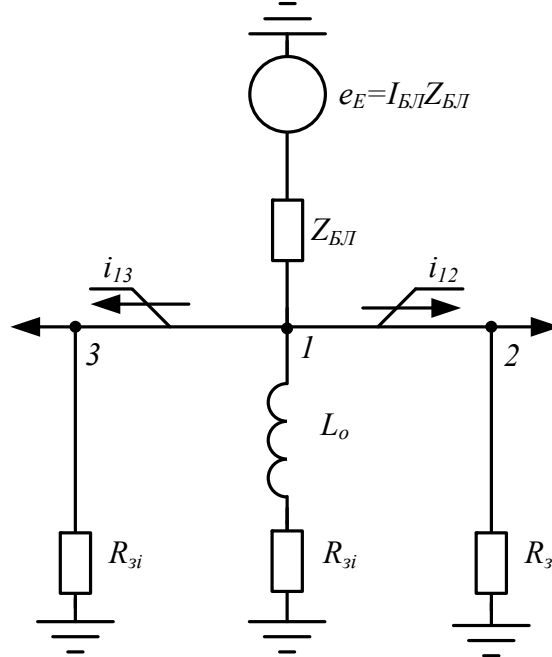


Рисунок 1.7 – Еквівалентна схема для розрахунку струму в опорі і його крутизни з урахуванням відбитих від сусідніх опор хвиль

$$U_1 \approx \chi \cdot i_{БЛ} \cdot R_{зи} + \chi^2 \cdot I'_{БЛ} \cdot L_o. \quad (1.14)$$

Вираз (1.14) достатньо точно описує напругу у вершині ураженої блискавкою опори лише до тих пір, поки хвилі, розповсюджуючись по тросах від цієї опори, не встигнуть відбитись від найближчих сусідніх опор і повернутись назад до ураженої опори.

Враховуючи, що довжина пробігу цих хвиль, рівна подвійній довжині троса в прогоні, складає 300...600 м, можна припустити, що віддзеркалення хвиль починають впливати вже через 1–2 мкс після початку імпульсу перенапруг.

Розрахунок повторних віддзеркалень від сусідніх опор можна провести за такою наближеною формулою:

$$U_o = \sqrt{\frac{\tau+1}{\tau^2+\tau+1}} \chi R_{zi} I_{БЛ} + \sqrt{\frac{1}{\tau+1}} I'_{БЛ} (\chi^2 L_o + M_{об}), \quad (1.15)$$

де  $\tau = \tau_\phi \frac{\pi \chi^2 R_{zi}}{Z_{mp} \tau_{np}}$ ,  $\tau_{np}$  – час пробігу хвилі на прогоні.

З цього виразу видно, що врахування віддзеркалень від сусідніх опор дає істотне зниження амплітуди для пологих хвиль напруги на вершині ураженої опори, при  $\tau_\phi \rightarrow \infty U_o$  прагне до нуля, зменшуючись обернено пропорційно  $\sqrt{\tau_\phi}$ .

Напруга на опорі, ураженій блискавкою, містить, окрім падіння напруги на опорі заземлення та індуктивності опори, ще одну складову внаслідок індуктивного зв'язку між каналом блискавки з струмом  $I_{БЛ}$  та тілом опори. Коефіцієнт взаємної індукції  $M_{об}$  приблизно визначається з виразу  $M_{об} \approx M_{об}^* h_{он}$ , де  $M_{об} \approx 0,2$  мкГ/м.

Таким чином, до приходу відбитих хвиль напруга на вершині ураженої опори рівна

$$U_o = \chi R_{iz} I_{БЛ} + I'_{БЛ} (\chi^2 L_o + M_{об}). \quad (1.16)$$

Для двох тросів  $Z_{mp}$  з урахуванням корони може бути розраховано за формулою (рис. 1.8,б):

$$Z_{mp} = \frac{Z_{mp2} + Z_{23}}{0,9 \cdot 2} = \frac{Z_{mp2}}{2} + 30 \ln \frac{D_{23}}{d_{23}}, \quad (1.17)$$

де  $Z_{mp2}$  – хвильовий опір одного з двох вищезгаданих тросів;

$D_{23}$  – відстань між тросом 2 і дзеркальним відображенням троса 3, м;

$d_{23}$  – відстань між тросами 2 і 3, м.

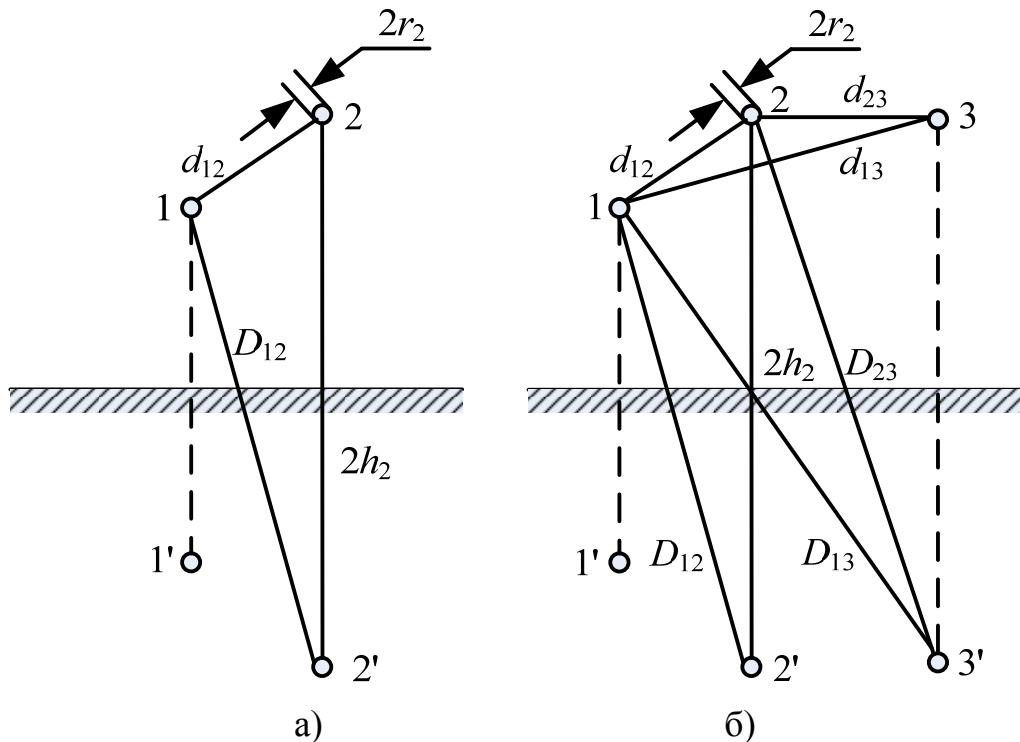


Рисунок 1.8 – Схема розташування проводу і тросів для розрахунку коефіцієнта зв'язку

Напруга на проводі біля опори, ураженої блискавкою, складається з трьох складових: робочої напруги, напруги, що індукується на проводі зарядом блискавки, і напруги, наведеної тросами під час розповсюдження по них хвиль з амплітудою, рівною  $U_o$ :

$$U_{np} = -U_{роб} - U_{інд} + U_o k_{mn}, \quad (1.18)$$

де  $k_{mn}$  – коефіцієнт зв'язку між проводами і тросами.

Удар блискавки в опору може відбутися за будь-якого миттєвого значення фазної напруги. Проте, оскільки розглядається удар в трифазну лінію електропередачі, найбільш вірогідним є зворотне перекриття на той провід лінії, на якому миттєве значення напруги має полярність, протилежну полярності блискавки. Більш того, з певним запасом можна прийняти, що ця напруга на проводі близька до амплітудного значення. Так, наприклад, під час удару блискавки від'ємної полярності у момент часу  $t_{m1}$  (рис. 1.9) найбільш імовірно перекриття ізоляції фази В, у момент  $t_{m2}$  і  $t_{m3}$  – фаз А і С, відповідно.

Індукована напруга  $U_{інд}$  у формулі (1.18) визначається індукцією, яка діє на провід, від зарядів і струмів у хмарі та у каналі лідера. В процесі формування каналу до місця удару блискавки по проводах і тросах стягуються заряди, полярність яких протилежна полярності блискавки.



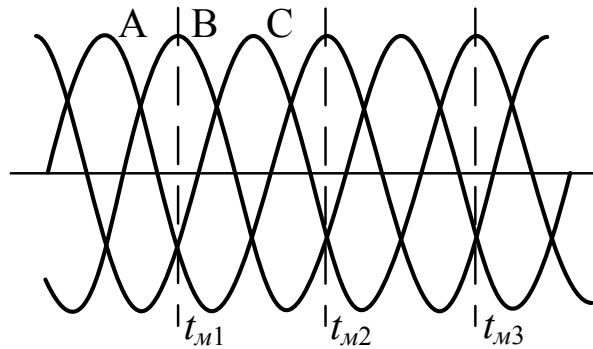


Рисунок 1.9 – До вибору розрахункового значення  $U_{роб}$

Під час удару блискавки в трос або вершину опори відбувається компенсація зарядів на тросі і виникає хвиля перенапруги, полярність якої відповідає полярності блискавки. На проводі компенсації зарядів не відбувається, і обумовлений цими зарядами потенціал протилежного знаку підвищує напругу на гірлянді на величину  $U_{інд}$ . Без урахування екранувального впливу троса  $U_{інд}$  може бути приблизно розрахована за формулою:

$$U_{інд} \approx E_{cp} \bar{h}_{np},$$

де  $E_{cp} \approx 10$  кВ/м – середня напруженість електричного поля в проміжку канал блискавки – земля перед ударом блискавки в трос.

Трос виконує екранувальну дію на провід, унаслідок чого середня напруженість поля поблизу проводу зменшується пропорційно величині  $(1-k_{mn})$ . При цьому

$$U_{інд} \approx E_{cp} \bar{h}_{np} (1-k_{mn}). \quad (1.19)$$

Удар блискавки у вершину опори приводить до виникнення на тросі хвилі перенапруг з амплітудою, рівною амплітуді напруги на вершині опори  $U_o$ . Розповсюджуючись тросом, ці хвилі створюють на фазних проводах напругу  $U_o \cdot k_{mn}$ .

Коефіцієнт зв'язку проводу 1 з окремим тросом або іншим проводом 2 визначається, з урахуванням явища корони, таким чином:

$$k_{mn} = \frac{Z_{12}}{Z_{mp}} = \frac{\ln D_{12}/d_{12}}{0,9 \ln 2h_2/r_2},$$

де  $D_{12}$  – відстань між проводом і дзеркальним відображенням троса щодо земної поверхні, м (див. рис. 1.8,а);

$d_{12}$  – відстань між проводом і тросом, м;

$h_2$  – середня висота троса над землею, м;

$r_2$  – радіус троса, м; коефіцієнт 0,9 враховує, що під час виникнення на тросі імпульсної корони коефіцієнт зв'язку зростає на 5... 10%. Коефіцієнт зв'язку проводу 1 з двома тросами 2 і 3 однакових радіусів, розташованими на однаковій висоті, з врахуванням корони розраховується за формулою:

$$k_{mn} = \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{mp}} = \frac{\ln(D_{12}D_{13}/d_{12}d_{13})}{0,9\ln(2h_2D_{23}/r_2d_{23})},$$

де  $Z_{mp}$  – хвильовий опір тросів, що коронують, обчислений за (1.17);

$D_{12}, D_{13}, D_{23}, d_{12}, d_{13}, d_{23}$  – визначається відповідно до рис. 1.8,б.

Напруга на гірлянді ізоляторів, рівна різниці напруги на вершині опори  $U_o$  і на проводі  $U_{np}$ , з урахуванням знаків індукованої напруги і робочої напруги, у момент удару блискавки рівна

$$\begin{aligned} U_{i3} &= U_o - U_{np} = U_o - (-U_{роб\_m} - U_{інд} + U_o k_{mn}) = \\ &= U_o (1 - k_{mn}) + U_{роб\_m} + U_{інд}, \end{aligned}$$

або, з урахуванням формул (1.16), (1.18) і (1.19),

$$U_{i3} = (\chi R_{34} I_{БЛ} + \chi^2 I'_{БЛ} L_o + I'_{БЛ} M_{об}) \cdot (1 - k_{mn}) + U_{роб\_m} + E_{ср} \bar{h}_{np} (1 - k_{mn}).$$

Слід відзначити, що складові напруги на проводі  $U_{інд}$  і  $U_{інд} k_{mn}$  за великого проміжку часу істотно зменшуються за рахунок розтікання зарядів по фазному проводі, і при  $\tau_\phi > \tau_{np}$  ними можна знехтувати.

Під час удару блискавки у вершину опори або трос поблизу неї напруга на гірлянді ізоляторів істотно відрізняється формою від імпульсу струму блискавки (на відміну від напруги на ізоляції під час прямих ударів у проводи). Наявність індуктивних складових  $(\chi R_{34} I_{БЛ} + \chi^2 I'_{БЛ} L_o + I'_{БЛ} M_{об}) \cdot (1 - k_{mn})$  призводить до збільшення напруги  $U_{i3}$  на фронті імпульсу струму блискавки, а зміна їх знака в спадній частині струму блискавки викликає різке зменшення  $U_{i3}$ . Тому розрахунковим випадком є перекриття у передрозрядний час

$t = \tau_{\phi}$ . Умова зворотного перекриття гірлянди записується у вигляді:  $U_{iz} \geq U_{\pi\phi}$ , де  $U_{\pi\phi}$  – напруга перекриття гірлянди у передрозрядний час, який рівний тривалості фронту імпульсу струму блискавки  $\tau_{\phi}$ .

За заданого  $\tau_{\phi}$  середнє значення крутизни струму блискавки

$$I'_{БЛ} = I_{БЛ} / \tau_{\phi}. \quad (1.20)$$

Розрахунковий струм блискавки, за якого можливе зворотне перекриття ізоляції, у відповідності з (1.13) і (1.15):

$$I_{БЛ}^0 = I_{БЛ\_on} = \frac{U_{\pi\phi} - U_{роб\_m} - E_{cp} \bar{h}_{np} (1 - k_{mn})}{(1 - k_{mn}) \left[ \chi R_{zi} + \chi^2 \frac{L_o}{\tau_{\phi}} + \frac{M_{об}}{\tau_{\phi}} \right]}. \quad (1.21)$$

Таким чином, критичне значення струму блискавки, яке викликає зворотні перекриття з опори на провід, залежить не тільки від характеристик лінії, але і від тривалості фронту імпульсу струму блискавки  $\tau_{\phi}$  (або його крутизни  $I'_{БЛ}$ ), тому визначення імовірності зворотних перекриттів за рівнем грозостійкості лінії  $I_{БЛ}$  (без урахування  $I'_{БЛ}$ ) може призвести до істотних похибок. Такий розрахунок повинен проводитися з одночасним врахуванням розподілу струму блискавки  $I_{БЛ}$  і його крутизни  $I'_{БЛ}$ . Для цього, згідно з (1.20) і (1.21), будується крива, яка відображає залежність  $I_{БЛ\_on}$  від  $I'_{БЛ}$  (крива небезпечних струмів, рис. 1.10).

Удари блискавки з об'єднанням параметрів  $I_{БЛ}$  та  $I'_{БЛ}$ , які визначають на рис. 1.10 точки, розташовані вище кривої небезпечних струмів, призводитимуть до перекриття гірлянд ізоляторів. Отже, імовірність перекриття можна визначити, проінтегрувавши по всій площі кривої небезпечних струмів щільність імовірності одночасної появи значень амплітуди і крутизни струмів блискавки.

Крива небезпечних струмів з достатньою, для практичних розрахунків, точністю може бути замінена гіперболою, рівняння якої має вигляд:

$$(I_{БЛ} - I_{БЛ\_мін}) I'_{БЛ} = A, \quad (1.22)$$

де  $I_{БЛ\_мін}$  – асимптота гіперболи, яка являє собою найменше значення амплітуди струму блискавки, за якої ще можливі перекриття;  
 $A$  – постійна величина.

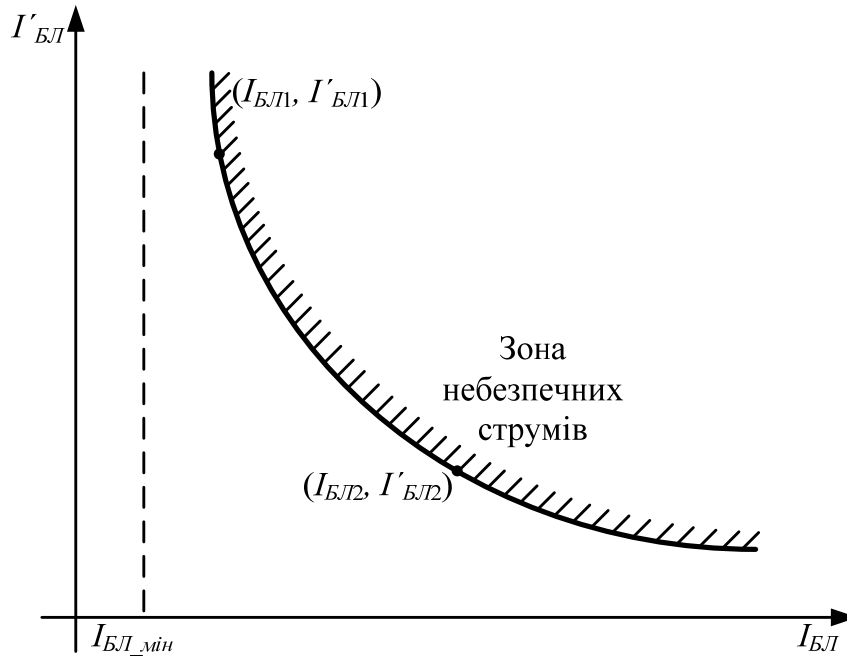


Рисунок 1.10 – Крива небезпечних струмів під час удару блискавки в вершину опори

За малої крутизни струму визначальне значення має падіння напруги на опорі заземлення, тому для перекриття гірлянди потрібна велика амплітуда струму блискавки  $I_{БЛ}$ . Проте, коли крутизна прямує до нуля, збільшення струму блискавки  $I_{БЛ}$ , навіть до дуже великих значень, не призводить до перекриття гірлянди, оскільки відбувається часткове відведення струму блискавки в сусідні опори, і напруга на гірлянді не досягає напруги перекриття. Під час зменшення амплітуди струму блискавки  $I_{БЛ}$  для перекриття гірлянди потрібна велика крутизна  $I'_{БЛ}$ . Проте за деякого мінімального  $I_{БЛ\_мін}$ , незалежно від величини  $I'_{БЛ}$ , перекриття не відбувається, оскільки одночасно зі зростанням напруги на гірлянді під час збільшення крутизни хвилі зростає і напруга перекриття гірлянди (відповідно до її вольт-секундної характеристики).

Параметри  $I_{БЛ\_мін}$  і  $A$  можуть бути визначені, якщо відомі координати двох характерних точок кривої небезпечних струмів, наприклад, точок, відповідних моментам  $\tau_{\phi 1} = 2$  мкс і  $\tau_{\phi 2} = 10$  мкс. Остання величина відповідає орієнтовно передрозрядному часу гірлянди під час прикладання 50% розрядної напруги.

$$I_{БЛ\_мін} = \frac{I_{БЛ1}I'_{БЛ1} - I_{БЛ2}I'_{БЛ2}}{I'_{БЛ1} - I'_{БЛ2}}; \quad A = \frac{I_{БЛ2} - I_{БЛ1}}{I'_{БЛ1} - I'_{БЛ2}} I'_{БЛ1} I'_{БЛ2}. \quad (1.23)$$

Імовірність перекриття гірлянди під час удару блискавки в вершину опори, іншими словами, площа над кривою небезпечних струмів (див. рис. 1.10) з достатньою точністю може бути визначена за такою формулою:

$$P_{1on} = P(I_{БЛ}, I'_{БЛ}) = \exp(-aI_{БЛ\ мин} - 2\sqrt{abA})\sqrt{1 + \pi\sqrt{abA}}, \quad (1.24)$$

де  $a=0,04$  1/кА;  $b=0,08$  мкс/кА – параметри експоненціальної апроксимації статистичного закону розподілу  $I_{БЛ}$ ,  $I'_{БЛ}$  без урахування їх кореляції.

### 1.5 Число відключень під час зворотного перекриття з троса на провід

Розрахункове річне число відключень лінії від удару блискавки в трос рівне:

$$n_{mp} = N_{ПУБ}(1 - P_{on})P_{mp}P_{\phi}(1 - P_{АПВ}). \quad (1.25)$$

Як уже наголошувалося, з віддаленням точки удару блискавки в трос від опори імовірність перекриття гірлянди знижується, але зростає імовірність перекриття повітряного проміжку поблизу точки удару. При цьому розглядається особливий розрахунковий випадок грозового ураження лінії, який умовно називається ударом блискавки в трос. Імовірність такого ураження може бути приблизно визначена за формулою:

$$P_{mp} \approx 1 - P_{on} = 1 - 4h_o/l_{np},$$

а розрахункове річне число ударів блискавки в трос

$$N_{mp} = N_{ПУБ}P_{mp}.$$

В точці удару блискавки в трос відбувається підвищення напруги, величину якої оцінюють за еквівалентною схемою (*electric circuit*) рис. 1.11,а.

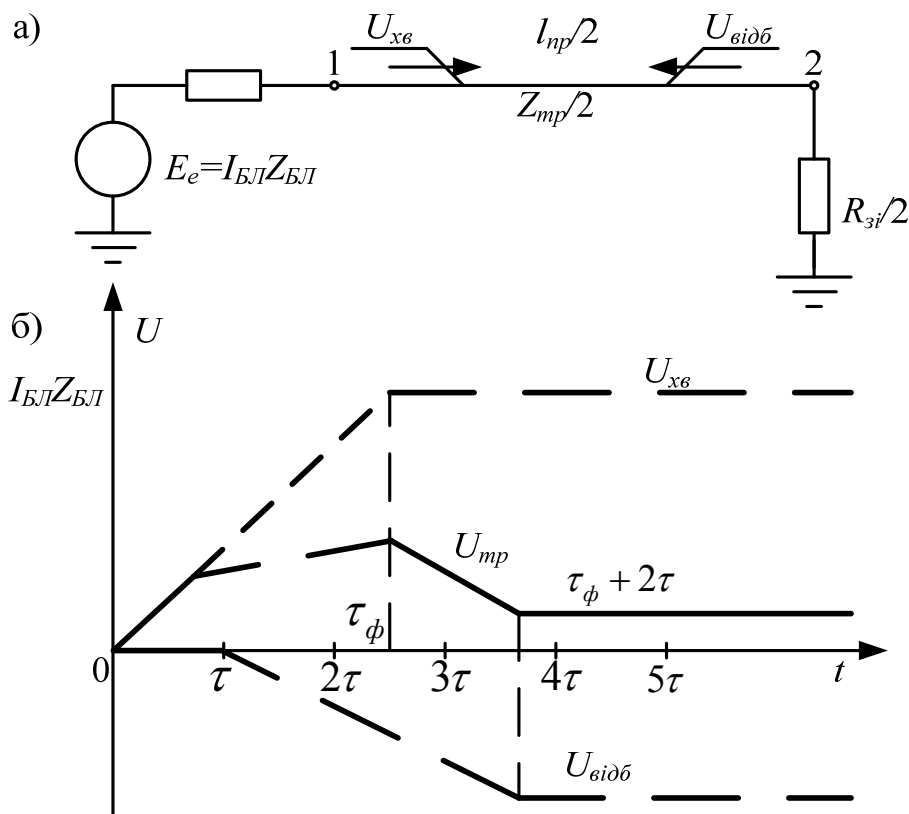


Рисунок 1.11 – Спрощена еквівалентна схема (а) і графік напруги на тросі (б) при ударі блискавки в трос у середині прогону

До приходу відбитих хвиль напруга в точці удару розраховується так само, як і під час удару блискавки в провід:

$$U_{mp} = i'_{БЛ} t \frac{Z_{БЛ} Z_{mp} / 2}{Z_{БЛ} + Z_{mp} / 2}.$$

Найбільший час запізнення приходу відбитих хвиль в точку удару  $\tau$  важливий під час удару блискавки в середині прогону. При цьому

$$\tau = l_{np} / c,$$

де  $l_{np}$  – довжина прогону,

$c$  – швидкість руху хвилі.

В цьому випадку розрахункова схема набуває вигляду, наведеного на рис. 1.11,а, де два відрізки тросу, які розходяться від точки удару блискавки, складено паралельно. Індуктивність  $L_o$ , унаслідок її малого впливу на даний процес, може не враховуватися.

Оскільки величина  $R_{zi}$ , як правило, набагато менша хвильового опору троса  $Z_{mp}$ , відбиті хвилі мають знак, протилежний знаку падаючої хвилі, а амплітуда і крутизна струму фронту хвиль за абсолютною величиною близькі до амплітуди і крутизни фронту падаючої хвилі, тому з моменту приходу відбитих хвиль зростання напруги в точці удару різко сповільнюється (рис. 1.11,б). Вони зустрічають в точці 1 опір, близький до хвильового опору еквівалентної лінії:  $Z_{БЛ} \approx Z_{mp}/2$ , тому повторних віддзеркалень хвиль в точці 1 практично не відбувається і їх можна не враховувати. З урахуванням таких припущень амплітуду напруги  $U_{mp}$  можна визначити за формулою:

$$U_{mp} = I'_{БЛ} \frac{l_{np}}{c} \frac{Z_{БЛ} Z_{mp} / 2}{Z_{БЛ} + Z_{mp} / 2}.$$

Таким чином, максимальна напруга на тросі, в основному, залежить не від амплітуди, а від крутизни струму блискавки  $I'_{БЛ}$ . За звичайних параметрів лінії ця напруга може досягати декількох мегавольт, і принципово можливі такі випадки пошкодження лінійної ізоляції: 1) перекриття повітряного проміжку трос-провід-земля в місці удару блискавки; 2) перекриття проміжку трос-земля, минаючи провід; 3) зворотне перекриття гірлянди ізоляторів на найближчій опорі.

Аналіз показує, що за умови

$$l_{mn} = 0,02 l_{np},$$

де  $l_{mn}$  – відстань по вертикалі між тросом і проводом;

$l_{np}$  – довжина прогону,

найбільш імовірним на практиці є випадок зворотного перекриття гірлянди ізоляторів. Умову перекриття гірлянди у разі удару блискавки в трос в середній частині прогону можна записати у вигляді

$$0,5 I_{mp} \geq (U_{50}^+ - U_{pоб}) / R_{zi} (1 - k_{mn}).$$

Для ліній електропередачі напругою 220 кВ і вище імовірність перекриття гірлянд від ударів блискавки в трос у середній частині прогону виявляється, зазвичай, набагато меншою, ніж імовірність

інших грозових уражень лінії, тому в розрахунках грозостійкості ліній нехтують цим видом уражень і приймають  $n_{mn}=0$ .

### 1.6 Число відключень під час ударів блискавки поблизу лінії

Під час ударів блискавки поблизу ПЛ на фазних проводах виникають індуковані напруги, які мають електричну і магнітну складові:

$$U_{ind} = U_{ind\_e} + U_{ind\_m}.$$

Заряди каналу лідера блискавки викликають появу на проводах зв'язаних зарядів протилежної полярності. Поле зв'язаних зарядів проводу врівноважується полем лідера, тому потенціал фазних проводів рівний нулю (без урахування робочої напруги). Під час досягнення лідером землі починається стадія головного розряду. При цьому, зв'язані заряди на проводі звільняються і утворюються хвилі напруги, що розповсюджується в обох напрямках по лінії. Це і є електрична складова індукованої напруги. Як показали дослідження, електрична складова індукованої напруги  $U_{ind\_e}$  прямо пропорційна середній висоті фазного проводу над землею, заряду каналу лідера і обернено пропорційна найкоротшій відстані від точки удару блискавки до лінії.

Зміна магнітного поля струму головного розряду створює е.р.с. у петлі найближча опора-гірлянда-провід-земля. Найбільша е.р.с. виникає в петлі з найближчої до місця удару блискавки опорою, особливо, якщо блискавка ударила поблизу цієї опори. Максимальне значення напруги, що виникає при цьому, на гірлянді ізоляторів також залежить від максимального значення струму блискавки, висоти проводу над землею і відстані від місця удару блискавки до проводу. Повне число випадків появи на лінії індукованих перенапруг з максимальним значенням, що перевищує  $U_{ind\_e}$ , пропонується розрахувати за формулою:

$$N_{ind} = \frac{9,36T_q h_{np}}{U_{ind}} \exp(-U_{ind}/260). \quad (1.26)$$

Результати розрахунку  $N_{ind}$  для ліній 6–110 кВ на металевих опорах наведені на рис. 1.12, з якого видно, що індуковані перенапруги можуть достатньо часто перевищувати імпульсну



міцність ізоляції ліній 6–10 кВ (20–30 разів на рік). Для ізоляції ліній 35 кВ небезпечні індуковані перенапруги виникають 4–5 разів на рік, а для ліній 110 кВ на металевих опорах без тросів – менше 1 разу на рік.

Число відключень лінії 110 кВ і вище через перекриття ізоляції внаслідок дії індукованих перенапружень  $n_{інд}$  визначається за формулою:

$$n_{інд} = N_{інд} P_{\delta} (1 - P_{АПВ}), \quad (1.27)$$

де  $N_{інд}$  – очікувана річна кількість небезпечних індукованих перенапруг з амплітудою, що перевищує імпульсний рівень ізоляції  $U_{інд} = U_{50}^+$ . Розрахунки показують, що для ліній 220 кВ і вище індуковані перенапруги практично не несуть з собою небезпеки і можуть не враховуватися під час оцінювання надійності блискавкозахисту.

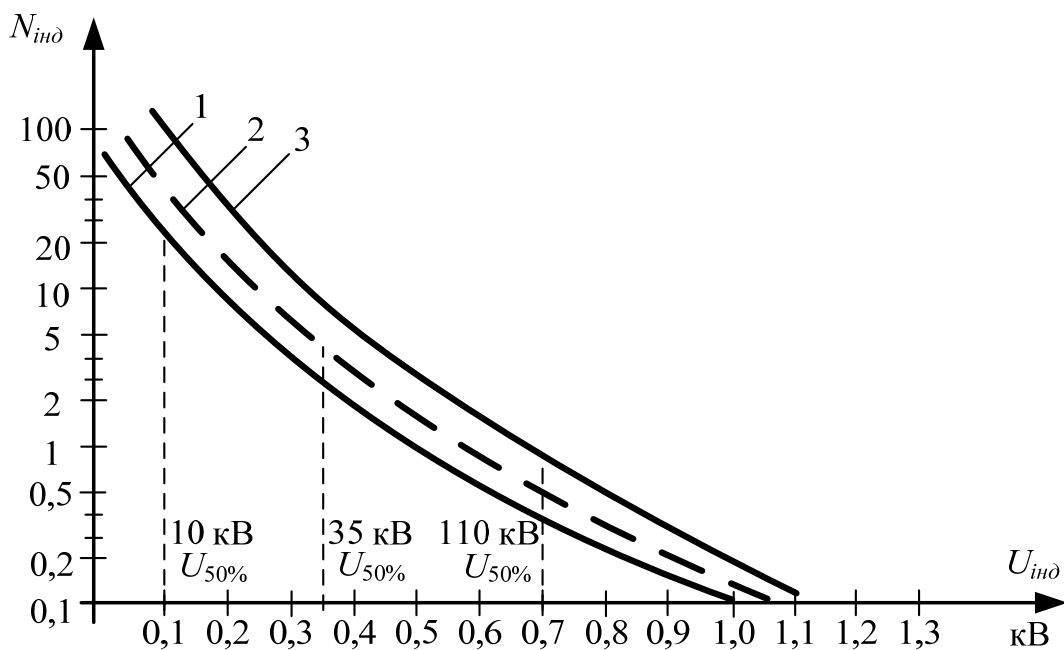


Рисунок 1.12 – Часткове річне число індукованих перенапруг (на 100 км довжини ЛЕП і 100 грозових годин):

1 –  $\bar{h}_{нр} = 10$  м; 2 –  $\bar{h}_{нр} = 15$  м; 3 –  $\bar{h}_{нр} = 20$  м

### 1.7 Блискавкозахист ПЛ різних класів напруг

Високу надійність блискавкозахисту повітряних ліній електропередачі забезпечують такі заходи:

– підвішування блискавкозахисних тросів з достатньо малими кутами захисту;

- зниження імпульсного опору заземлення опор;
- підвищення імпульсної міцності ізоляції ліній і зниження ймовірності встановлення дуги (зокрема, використання дерев'яних траверс і опор);
- застосування ізольованої нейтралі або дугогасильного реактора (*reactor*);
- використання автоматичного повторного ввімкнення ліній.

Розраховані за методикою, викладеною в попередніх підрозділах, питомі числа грозових відключень під час різних видів ураження лінії показують, що порядок отриманих оцінок сумарного питомого числа відключень  $n_{\Sigma}$ , в основному, узгоджується з даними на основі досвіду експлуатації (табл. 1.1 і рис. 1.13).

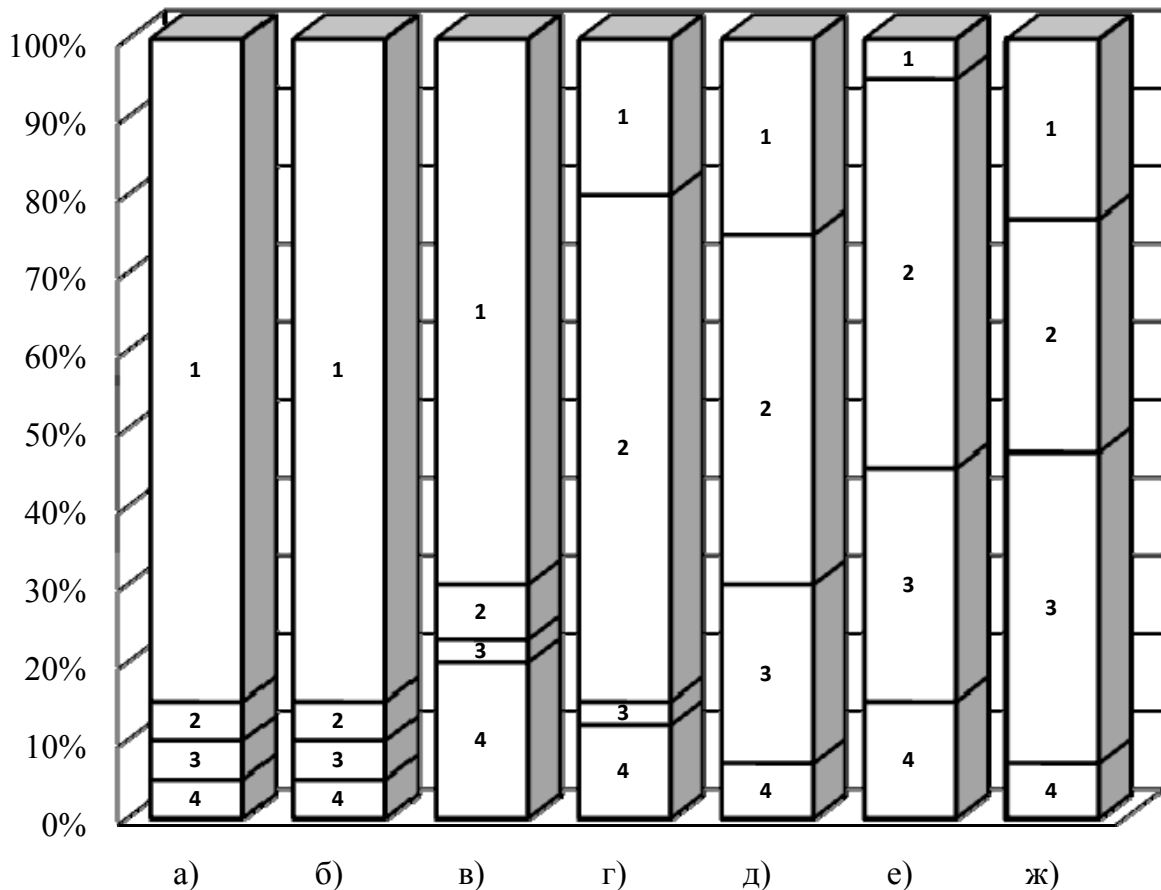


Рисунок 1.13 – Діаграма ймовірного числа відключень ліній різних класів напруг  $n_{\Sigma}$  на 100 км і 100 грозових годин:

Відносний розподіл між кількістю відключень:

1 – прорив блискавки на провід  $n_{np}$ ; 2 – удари блискавки в вершину опори  $n_o$ ; 3 – удари блискавки в трос  $n_{tr}$ ; 4 – індуковані перенапруги  $n_{ind}$ ; а) ПЛ-750 кВ, 1 ланцюг; б) ПЛ-500 кВ, 2 ланцюги; в) ПЛ-330 кВ, 1 ланцюг; г) ПЛ-220 кВ, 2 ланцюги; д) ПЛ-220 кВ, 1 ланцюг; е) ПЛ-110 кВ, 2 ланцюги; ж) ПЛ-110 кВ, 1 ланцюг

Таблиця 1.1 – Характеристики грозозахисту ВЛ 110–750 кВ

Номинальна напруга, кВ	110	110	220	220	330	500	750
Матеріал опор	З/бетон	Метал	З/бетон	Метал	Метал	Метал	Метал
Марка проводів	АС-120	АС-150	АСО-330	АСО-330	2АСО-400	3АСО-400	4АСУ-400
Кількість і тип ізоляторів на опорі	8ПС6-Б	8ПС6-Б	14ПС6-Б	14ПС6-Б	22ПС6-Б	28ПС12-А	2х41ПС12-А
Захисний кут троса $\alpha$ , град.	31,2	20,7	29,0	24,2	22,6	22,7	24,7
Імпульсний опір заземлення опор $R_{зв}$ , Ом	20	15	15	10	10	10	10
Питоме число прямих ударів блискавки в рік для $T_q=100$ год. і при довжині лінії $l=100$ км – $N_{ПУБЛ}$ уд/100 км 100 год.	100	165	182	227	153	174	207
Питоме число відключень лінії в рік під час удару блискавки у провід $n_{np}$ , 1/рік	0,06	0,06	0,23	0,18	0,22	0,11	0,063
Питоме число відключень лінії в рік під час удару блискавки в опору $n_o$ , 1/рік	0,81	1,73	0,41	0,45	0,002	<0,001	<0,001
Питоме число відключень лінії в рік під час удару блискавки у трос $n_{mp}$ , 1/рік	0,43	0,89	0,13	<0,01	<0,001	<0,001	<0,001
Питоме число відключень лінії в рік унаслідок індукованих перенапруг $n_{ind}$ , 1/рік	0,25	0,38	0,03	0,04	0,003	<0,001	<0,001
Питоме число грозових відключень лінії в рік $n_{\Sigma}$ , 1/рік	1,55	3,06	0,80	0,68	0,23	0,11	0,066

Лінії напругою 220 кВ і вище, як правило, споруджуються на металевих або залізобетонних опорах. При цьому основним засобом блискавкозахисту є троси, що розташовуються над фазними проводами з достатньо малим кутом захисту  $\alpha$ . Кут захисту, залежно від висоти опор, підбирається так, щоб понизити число прямих ударів блискавки у фазні проводи приблизно на 2–3 порядки. Ця умова забезпечується, зазвичай, при  $\alpha = 20 \dots 30^\circ$ . Проте, як показують дані табл. 1.1 і досвід експлуатації, випадки прориву блискавки на проводи є визначальними в сумарному числі небезпечних грозових уражень ліній 330 кВ і вище, спостерігається збільшення їх числа зі зростанням номінальної напруги лінії. Це пов'язано зі збільшенням висоти опор і відповідним зниженням ефективності тросового захисту, а також зі зростанням впливу електричного поля фазних проводів на напрям розвитку лідера блискавки. В цілях збереження високої надійності тросового захисту на лініях 220 кВ і вище рекомендовано застосування тросів з від'ємними кутами захисту.

Для зменшення грозових уражень лінії надвисокої напруги частіше монтують на опорах, які мають горизонтальне розташування фаз (наприклад, порталних). Це дозволяє понизити загальну висоту ліній. Додаткове зниження числа зворотних перекриттів дає також використання опор, закріплених металевими відтяжками, які зменшують індуктивність шляху струму блискавки від вершини опори в землю та імпульсний опір заземлення.

На порталних опорах, що мають велику відстань між крайніми фазами, достатньо малий кут захисту забезпечується шляхом підвішування двох тросів, розташованих на однаковій висоті.

Якщо троси заземлені на кожній опорі, то виникають замкнені контури, в яких під впливом магнітного поля робочого струму наводяться е.р.с. і починають протікати вихрові струми. Для зменшення пов'язаних із цим втрат електричної енергії троси безпосередньо приєднують до заземленої опори лише на кінці анкерної ділянки, а на проміжних опорах підвішують на одному – двох ізоляторах, зашунтованих іскровим проміжком. Під час грозових перенапруг ці іскрові проміжки пробиваються, і трос виявляється практично заземленим на кожній опорі.

Для ефективного відведення струму блискавки в землю і запобігання зворотним перекриттям ізоляції опори лінії забезпечуються відповідними заземлювачами, що знижують імпульсний опір заземлення кожної опори до значення  $R_{iz} < 10 \dots 20$  Ом. Вищі значення опору заземлення опор допускаються лише для ліній, розташованих в районах з високим питомим опором ґрунту ( $\rho > 1000$  Ом·м). У ґрунтах з  $\rho > 1000$  Ом·м бажано

застосовувати ефективні глибинні заземлювачі або, в крайньому випадку, багатопроменеві заземлювачі довжиною 20–30 м.

Додатковим засобом зменшення грозового ураження ліній 220 кВ і вище є використання АПВ.

Комплекс перерахованих засобів забезпечує порівняно високий рівень надійності блискавкозахисту ліній надвисокої напруги: питоме число грозових відключень складає 0,05...0,1 на 100 км і 100 грозових годин. Слід зазначити, що найбільш високе питоме число грозових відключень (на порядок більше, ніж для інших ліній) мають дволанцюгові лінії, змонтовані на опорах баштового типу. Велика висота опор обумовлює на цих лініях збільшення ймовірності прориву блискавки повз троси, а також збільшення ймовірності зворотних перекриттів за рахунок підвищення індуктивності опори (див. рис. 1.13).

Лінії 110-150 кВ на металевих або залізобетонних опорах в більшості випадків також захищаються по всій довжині тросами. Кут захисту для цих ліній зазвичай вибирається в межах 20–30°, що при відносно невеликих висотах і довжинах цих ліній забезпечує задовільну надійність захисту (див. табл. 1.1). Проте нерідко лінії 110 кВ експлуатуються і без тросового захисту. До таких випадків відносять:

а) проходження лінії в районах із слабкою інтенсивністю грозової діяльності ( $T_q < 20$  год);

б) високий питомий опір ґрунту, що не дозволяє забезпечити малий опір заземлення і ефективну роботу троса;

в) розташування ліній в особливо льодяних районах, де часто спостерігається рух проводів і великі механічні навантаження на трос під час обмерзання створюють небезпеку обриву троса;

г) наявність на трасі лінії районів з агресивними навантаженнями промислових підприємств, що викликають швидку корозію тросів і небезпеку їх обриву;

д) розташування лінії в гірській місцевості, де розряди з великими струмами блискавки рідко досягають проводів лінії, орієнтуючись переважно на гірські масиви, що знаходяться поблизу.

Відсутність блискавкозахисного тросу призводить до підвищення числа коротких замикань на лінії внаслідок грозових перекриттів. При цьому часто спрацьовують пристрої АПВ і збільшується число небезпечних впливів на лінії зв'язку і число дій струмів коротких замикань на електроустановки мережі. Зростає також і ймовірність протікання великих струмів через заземлювальні пристрої підстанції. Не дивлячись на це, з техніко-економічної точки зору відсутність тросів на лініях 110–150 кВ на металевих опорах у ряді випадків виявляється виправданою, а блискавкозахист

виявляється задовільним завдяки відносно невеликій висоті і довжині таких ліній.

Лінії 110–150 кВ на дерев'яних опорах не вимагають підвищення блискавкозахисних тросів, достатня грозостійкість цих ліній забезпечується високою імпульсною міцністю лінійної ізоляції і малим градієнтом напруги уздовж шляху перекриття, що обумовлює малу імовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу. Якщо на лінії деякі опори виконані металевими або залізобетонними (наприклад, кутові або анкерні), то на них повинні встановлюватися вентиляльні розрядники (*aerial fuse, discharge switch*) або обмежувачі перенапруг (*overvoltage limiter*).

Важливим засобом підвищення надійності блискавкозахисту ліній 110–150 кВ на дерев'яних опорах є застосування АПВ.

Під час грозових уражень лінії на дерев'яних опорах спостерігається механічне розщеплення і поломки траверс, а також інших частин опори. Число таких пошкоджень сильно залежить від якості підготовки деревини під час спорудження ПЛЕП; необхідне ретельне і глибоке просочення опор для запобігання їх загниванню.

Лінії 35 кВ на металевих опорах захищаються тросами лише в особливо відповідальних випадках. Зазвичай вони і без тросів виявляються грозостійкими. Як наголошувалося вище, основними блискавкозахисними заходами тут є використання ізольованої нейтралі або дугогасильного реактора, а також АПВ. Як видно з табл. 1.2, де наведені типові характеристики ліній 6–35 кВ і оцінки питомого числа грозових відключень за різних розрахункових дій, для ліній 35 кВ на металевих опорах вже істотна частка відключень визначається індукованими перенапругами.

Лінії 35 кВ на дерев'яних опорах мають вищу надійність блискавкозахисту за рахунок використання високої імпульсної міцності дерева. Наведені в табл. 1.2 значення питомого числа їх відключень мають орієнтовний характер, оскільки імпульсна міцність дерева, за літературними даними, може змінюватися в два – три рази залежно від ступеня зволоження і стану деревини. Крім того, опір заземлення залізобетонних пасинків на дерев'яних опорах, які не мають струмовідвідних спусків, не нормується, що може привести до великого розкиду його значень на реальній лінії.

Лінії 3–20 кВ як на металевих, так і на дерев'яних опорах також не мають тросового захисту і захищаються від грозових дій за допомогою дугогасильного реактора або ізольованої нейтралі і АПВ. На опорах з ослабленою ізоляцією або з підвищеною ймовірністю грозового ураження доцільно встановлювати вентиляльні розрядники або ОПН.

Таблиця 1.2 – Характеристики блискавкозахисту ПЛ 6–35 кВ

Номинальна напруга $U_{ном}$ , кВ	6	6	35	35
Матеріал опор	Дерево	З/бетон	Дерево	Метал
Марка проводів	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120
Кількість і тип ізоляторів на опорі	ШС10-А	ШС10-А	2ПС6-Б	3ПС6-Б
Імпульсний опір заземлення опор $R_{із}$ , Ом	40	40	30	20
Питоме число прямих ударів блискавки $N_{ПУБЛ}$ в рік за $T_q=100$ год. і довжині лінії $l=100$ км	55	50	66	96
Питоме число відключень лінії в рік під час прямих ударів блискавки $n_{ПУБ}$ , 1/рік	3,6	13,0	0,55	7,9
Питоме число відключень лінії в рік під час індукованих перенапруг $n_{інд}$ , 1/рік	0,001	7,3	0,001	1,3
Питоме число грозових відключень лінії $n_S=n_{ПУБ}+n_{інд}$ , 1/рік	3,6	20,0	0,55	9,2

Окремі місця ліній вимагають додаткових заходів захисту. До таких місць відносять:

- перетини ліній електропередачі між собою;
- перетини ліній електропередачі з лініями зв'язку, трамвайними лініями і лініями електрифікованої залізниці;
- опори ліній електропередачі з пониженою електричною міцністю ізоляції (*dielectric strength*);
- високі опори перехідних прогонів;
- відгалуження до підстанцій на відпайках і секційні роз'єднувачі (*disconnector*) на лініях;
- кабельні вставки (*cable insertion*) на лініях.

Захист перетинів ліній електропередачі викликаний необхідністю запобігти важким аваріям у разі грозового перекриття з верхньої лінії на нижню лінію електропередачі або зв'язку. Такі перекриття можуть викликати помилкову роботу релейного захисту і системні аварії, пошкодження електроустаткування ліній нижчої напруги і навіть спричинити людські жертви. Найбільшу небезпеку несе удар блискавки в прогін перетину. Відстань між проводами пересічних ліній в цьому прогоні повинна бути достатньо великою, а амплітуда перенапруг обмежена розрядниками, розташованими якомога ближче до місця перетину, тому в прогоні перетину доцільно зняти блискавкозахисний трос з нижньої лінії і вибрати точку

перетину далі від середини прогону верхньої лінії. Якщо відстань від місця перетину до найближчої опори не перевищує 40 м, то розрядники можна встановлювати тільки на найближчій опорі. На лініях до 35 кВ, що мають пристрій АПВ, замість розрядників допускається встановлення захисних проміжків. Опір заземлення опор прогону перетину не повинен перевищувати 10...20 Ом. Якщо опори дерев'яні, то на них рекомендується встановлювати паралельно гірляндам ізоляторів розрядники або іскрові проміжки, з'єднані спусками із заземлювачами опори.

Необхідна відстань  $S$  по вертикалі між проводами пересічних ліній залежить від номінальної напруги верхньої лінії, опору заземлення опор, довжини прогону і відстані між місцем перетину і найближчою опорою. Встановлення захисних засобів дозволяє зменшити відстань  $S$  на 20–30%.

Окремі металеві і залізобетонні опори ліній, виконаних, головним чином, на дерев'яних опорах без тросів, є місцями з пониженою імпульсною електричною міцністю ізоляції. Ці місця доцільно захистити трифазними комплектами розрядників.

Високі перехідні прогони повітряних ліній електропередачі є джерелом підвищеного числа грозових уражень. Це пов'язано з великою висотою опор і проводів над землею, що призводить до збільшення числа ударів блискавки в прогін, зниження ефективності захисту тросом, збільшення числа зворотних перекриттів через велику індуктивність опор. Зниження імпульсного опору заземлення перехідних опор в цьому випадку стає недостатнім.

Розрахунок очікуваного числа відключень ЛЕП з високими перехідними прогонами ускладнений необхідністю врахування складного рельєфу місцевості під прогоном і великої різниці висоти проводу над землею на окремих ділянках прогону, тому блискавкозахист відповідальних прогонів розглядається індивідуально. Як показують розрахунки, найбільш ефективним засобом захисту високих переходів є встановлення вентильних розрядників або ОПН у верхній частині перехідних опор або на опорах, сусідніх з перехідними.



## 2 БЛИСКАВКОЗАХИСТ ПІДСТАНЦІЙ

### 2.1 Завдання і критерії блискавкозахисту підстанції

Надійність захисту електричних станцій і підстанцій від грозових перенапруг повинна бути значно вищою надійності блискавкозахисту ліній електропередачі. Це визначається значно більшим збитком від грозових перенапруг на підстанціях, ніж на лініях. Внутрішня ізоляція силових трансформаторів та іншого підстанційного обладнання має менші рівні в порівнянні з ізоляцією лінії і не має властивості самовідновлення після згасання дуги грозового перекриття.

Захист устаткування підстанцій від прямих ударів блискавки забезпечується стрижневими блискавковідводами. Крім того, необхідний захист від хвиль, що виникають на лініях, які відходять від підстанції, під час ударів блискавки в проводи або опори цих ліній.

Захист від набіжних хвиль (*incoming wave; arriving wave*), базується на виборі ОПН або розрядників з відповідними захисними характеристиками, виборі їхнього числа і місця встановлення, а також на посиленні захисту підходів ліній для зниження числа набіжних хвиль з великою крутизою напруги на фронті.

Як і для ліній електропередачі, для порівняння ефективності різних заходів блискавкозахисту підстанцій застосовується ряд критеріїв.

Рівень грозостійкості, як і для ліній електропередачі, визначається верхніми межами амплітуди струму блискавки під час прямих ударів у підстанцію, за яких ще не відбувається прямого або зворотного перекриття між струмоведучими і заземленими частинами об'єкта. Рівень грозостійкості дозволяє оцінити ймовірність ушкодження обладнання на підстанції під час прямого удару блискавки в блискавковідвід (*lightning arrester; lightning discharger; lightning conductor*) або під час прориву блискавки на захищене обладнання, мінаючи блискавковідводи. Для оцінювання ймовірності ушкодження від набіжних хвиль на підстанцію використовувати рівень грозостійкості як критерій виявляється неможливим, оскільки амплітуди перенапруг у різних точках підстанції істотно залежать не тільки від амплітуди, але й від крутизни фронту набіжних хвиль перенапруг.

Крива небезпечних хвиль являє собою границю області безпечних поєднань амплітуди й крутизни (або довжини фронту) хвиль, що дійшли до підстанції. Імовірність ушкодження обладнання підстанції внаслідок набіжних хвиль може бути визначена шляхом інтегрування щільності ймовірності всіх можливих поєднань їхньої

амплітуди й крутизни по області, розташованій вище кривої небезпечних хвиль.

Показник надійності блискавкозахисту є більш об'єктивним критерієм ефективності блискавкозахисту підстанції. Він визначається як середнє очікуване число років безаварійної роботи підстанції під час грозових впливів. Показник надійності блискавкозахисту може бути розрахований за формулою:

$$\tau = \frac{1}{n_{np} + n_z + n_l + n_{nidv}} \cong \frac{1}{n_l + n_{nidv}}, \quad (2.1)$$

де  $n_{np}$  – очікуване середньорічне число перевищень припустимого рівня перенапруг внаслідок проривів блискавки на підстанцію;

$n_z$  – те ж внаслідок зворотних перекриттів під час ударів блискавки в блискавковідводи і заземлені конструкції підстанції;

$n_l$  – те ж внаслідок ударів блискавки в лінії за межами захищеного підходу лінії;

$n_{nidv}$  – те ж внаслідок ударів блискавки в лінію в межах захисного підходу лінії.

Практично під час встановлення блискавковідводів відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) і забезпечення їхнього малого опору заземлення складові  $n_{np}$  і  $n_z$  виявляються значно меншими, ніж  $n_l$  і  $n_{nidv}$  і надалі можуть не враховуватися.

## 2.2 Захист від прямих ударів блискавки

Для вибору необхідного числа і місця розташування блискавковідводів на території підстанції необхідно знати зони захисту блискавковідводів. Зоною захисту називається та частина простору біля блискавковідводу, у якій число влучень блискавки в захищений об'єкт знижується не менш, ніж від 20 до 200 разів, тобто ймовірність прориву блискавки в захищений об'єкт не перевершує 0,05 або 0,005 щодо ймовірності влучення блискавки у випадку відсутності блискавковідводу. Границі зони захисту блискавковідводів визначалися шляхом моделювання каналу блискавки довгою іскрою в лабораторних умовах і наступного уточнення розрахунками, що враховують розходження в умовах формування траєкторії каналу блискавки і лабораторного розряду.

Зона захисту окремо встановленого стрижневого блискавковідводу (рис. 2.1) являє собою конус із вершиною, розташованою на висоті  $h_0 < h$ , де  $h$  – висота блискавковідводу. Для

ймовірності влучення блискавки в об'єкт  $P_{np}=0,05$  величина  $h_0$  становить  $h_0=0,92h$ , а межа зони захисту описується рівнянням:

$$r_x = 1,5 \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right).$$

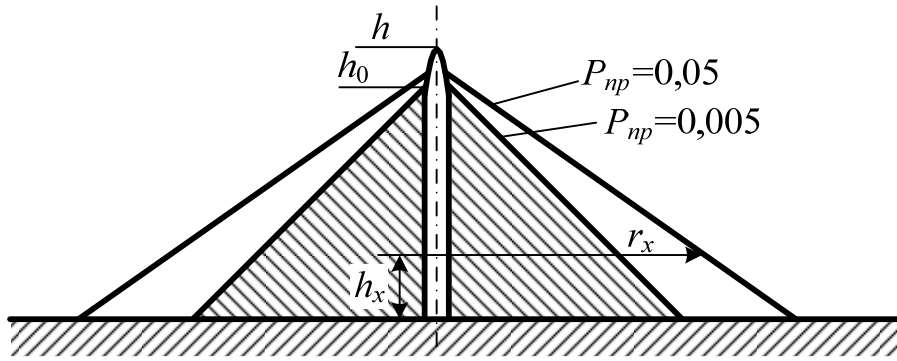


Рисунок 2.1 – Зона захисту окремо встановленого блискавковідводу

Для ймовірності влучення блискавки  $P_{np}=0,005$  висота  $h_0$  становить  $h_0=0,85h$ , а межа зони захисту:

$$r_x = (1,1 - 0,002h) \cdot \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right).$$

Якщо два стрижневих блискавковідводи розташовані поблизу один одного на відстанях не більше  $(3-5)h$ , то зона захисту збільшується в порівнянні із сумою зон захисту кожного з них, як показано на рис. 2.2.

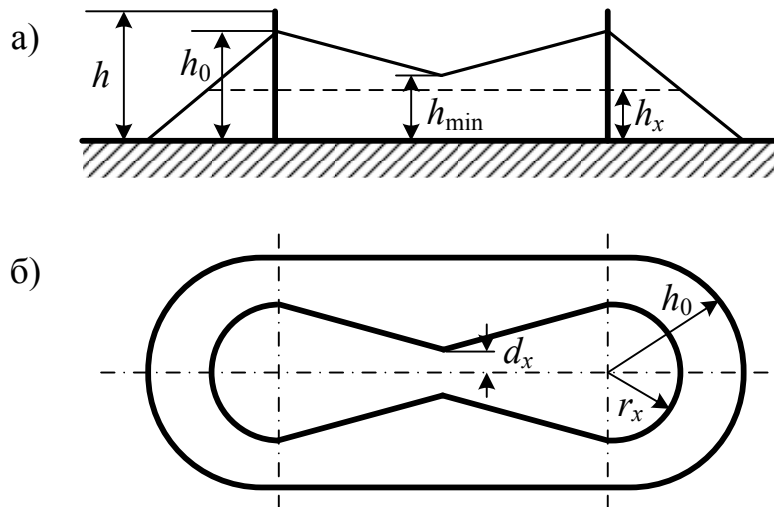


Рисунок 2.2 – Зона захисту двох стрижневих блискавковідводів

Якщо кілька блискавковідводів розташовані поблизу один одного, на відстані не більше  $(3-5)h$ , то їхня сумарна зона захисту визначається попарними зонами захисту найближчих блискавковідводів. Якщо відстань між найближчими блискавковідводами перевищує  $5h$  (за  $P_{np}=0,05$ ) або  $3h$  (за  $P_{np}=0,005$ ), то кожний блискавковідвід бажано розглядати як окремо встановлений.

Для ймовірності прориву блискавки  $P_{np}=0,05$  параметри зони захисту подвійного стрижневого блискавковідводу описуються формулами:

$$h_{\min} = \begin{cases} h_0 & \text{для } l \leq 1,5h; \\ h_0 - 0,14(l - 1,5h) & \text{для } l > 1,5h; \end{cases}$$

$$d_x = \begin{cases} r_x & \text{для } l \leq 1,5h; \\ r_0(h_{\min} - h_x)/h_{\min} & \text{для } l > 1,5h. \end{cases}$$

Для  $P_{np}=0,005$ :

$$h_{\min} = \begin{cases} h_0 & \text{для } l \leq h; \\ h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(l - h) & \text{для } l > h; \end{cases}$$

$$d_x = \begin{cases} r_x & \text{для } l \leq h; \\ r_0(h_{\min} - h_x)/h_{\min} & \text{для } l > h. \end{cases}$$

Захист протяжних об'єктів (повітряних ліній електропередачі, перемичок між трансформаторами, встановленими на греблі ГЕС, і розподільними пристроями станцій й т.п.) здійснюється за допомогою тросових блискавковідводів. Блискавкозахисні троси натягають над проводами, які захищаються, на достатній висоті й заземлюють на опорах для вільного стікання струму блискавки в землю. Зона захисту окремо встановленого тросового блискавковідводу визначається за формулами:

$$\text{для } P_{np}=0,05: \quad \begin{aligned} h_0 &= 0,95h, \\ r_x &= 1,7 \left( h - \frac{h_x}{0,95} \right); \end{aligned}$$

$$\text{для } P_{np}=0,005: \quad \begin{aligned} h_0 &= 0,85h; \\ r_x &= (1,35 - 0,0025h) \left( h - \frac{h_x}{0,85} \right). \end{aligned}$$

У випадку підвішування двох тросових блискавковідводів на відстанях  $l$  один від одного найменша висота зони захисту посередині між ними визначається за формулою:

$$h_{\min} = \begin{cases} h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} h)(l - h) & \text{для } l \geq h; \\ h_0 & \text{для } l < h. \end{cases}$$

Дослідження показують, що ефективність захисту блискавковідводів у значній мірі залежить від співвідношення зарядів, індукованих на захищеному об'єкті і на блискавковідводі під час наближення каналу лідера блискавки з оточуючими його об'ємними зарядами. Для підвищення надійності блискавкозахисту рекомендується змінити конструкцію блискавковідводу таким чином, щоб збільшити заряд, індукований на вершині блискавковідводу й у прилеглому просторі.

### 2.3 Захист підстанцій від хвиль, що набігають із лінії електропередачі

За великої крутизни набіжної хвилі на підстанцію, миттєві значення і амплітуди напруги в різних точках її схеми виявляються різними. Наприклад, якщо захищений об'єкт (1) виявився першим по ходу хвилі відносно захисного ОПН або розрядника (4) (рис. 2.3), а відстань між ними по ошиновуванню дорівнює  $l_{12}$ , то початок хвилі прийде до розрядника пізніше, ніж до об'єкта, на час  $t_{12} = l_{12}/c$ , де  $c$  – швидкість руху хвилі. Коли хвиля ще тільки почне підйом напруги на розряднику, на об'єкті (1) напруга вже досягне значення  $U_1 = U'_e \cdot t_{12}$ , де  $U'_e$  – крутизна набіжної хвилі.

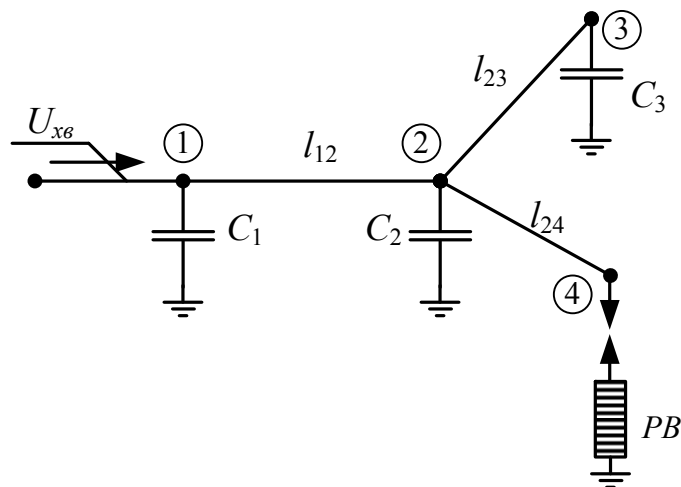


Рисунок 2.3 – Еквівалентна розрахункова схема підстанції

У той момент, коли напруга на розряднику досягне пробивної (*punch-through voltage; disruption voltage*)  $U_{np}$  і він спрацює, на об'єкті (1) напруга вже перевищить це значення на величину  $U'_6 \cdot t_{12}$ , а амплітуда напруги на об'єкті, яка спостерігається в момент приходу відбитої від спрацювавшого розрядника хвилі, перевищить напругу на розряднику на величину  $\Delta U = 2t_{12}U'_6$ . Таким чином, для успішного захисту об'єкта розрядник повинен мати пробивну і залишкову напругу нижче допустимої на захищеному об'єкті на величину не менше  $\Delta U$ . Ця величина називається інтервалом координації. Бажано мати інтервал координації не менше 15-30% від рівня допустимої напруги на об'єкті.

У звичайних схемах підстанції, де вжиті заходи для обмеження крутизни набіжних хвиль і віддалення розрядників від захищеного устаткування не перевищує 150...200 м, амплітуда перенапруг викликаних надходженням грозових хвиль по лініях, у будь-якій точці ошиновування підстанції не перевищує  $1,3U_{зал}$ , де  $U_{зал}$  – залишкова напруга вентильного розрядника або ОПН.

На форму імпульсів перенапруг у різних точках підстанції впливають вхідні ємності силових трансформаторів та інших елементів схеми, а також лінії електропередачі, які відходять від підстанції. Типові криві імпульсів грозових перенапруг, розраховані для еквівалентної схеми тупикової підстанції 110 кВ (див. рис. 2.3), показують, що для трансформаторів характерна наявність у кривій напруги двох складових: аперіодичної хвилі й накладених коливань, що згасають (рис. 2.4). У розрахунку приймалися  $l_{12}=45$  м,  $l_{23}=30$  м,  $l_{24}=15$  м,  $C_1=730$  пФ,  $C_2=900$  пФ,  $C_3=1000$  пФ, як розрядник використовувався РВС-110.

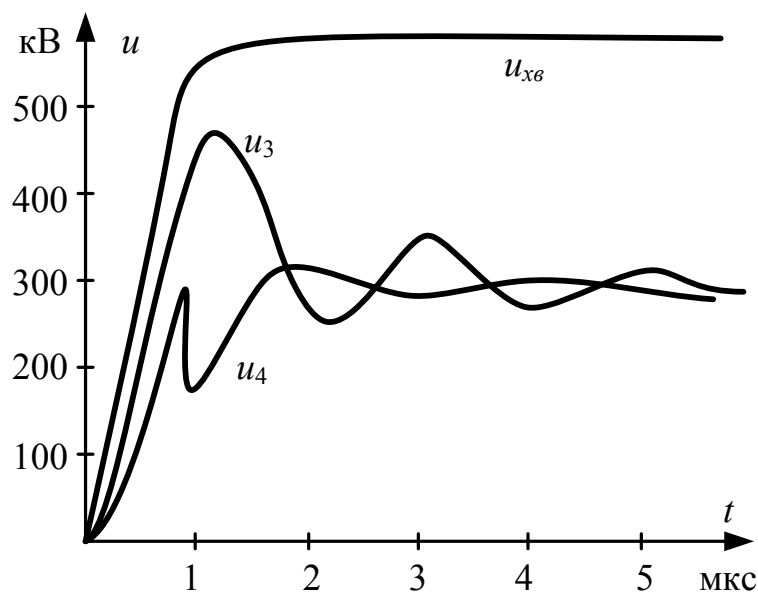


Рисунок 2.4 – Криві напруги у вузлових точках схеми рис. 2.3

Особливістю перенапруг на підстанції є їхня значна залежність від крутизни фронту й від амплітуди набіжної хвилі. Залишкова напруга на захисному апараті залежить тільки від амплітуди впливу, слабо міняючись завдяки пологій кривій вольт-амперної характеристики його нелінійних опорів.

Для забезпечення блискавкозахисту підстанцій від набіжних по лініях хвиль грозових перенапруг необхідні такі заходи:

1) вибір одного або декількох трифазних комплектів вентильних розрядників (або ОПН), у яких пробивна й залишкова напруга нижче припустимого рівня перенапруг на певну величину, названу інтервалом координації  $\Delta U_K$ ;

2) захист підходів ліній від прямих ударів блискавки на певній довжині  $l_n$ , при якій забезпечується достатнє згладжування фронту набіжних хвиль і зниження струму в розрядниках;

3) визначення такої кількості ОПН або розрядників і місць їхнього встановлення, за якої відстань між кожним з об'єктів, що захищається, і найближчим до нього захисним апаратом  $l_p$  не перевищує безпечної величини, яка залежить від схеми підстанції, довжини захищеного підходу лінії та інтервалу координації.

Вибір схеми блискавкозахисту підстанції зводиться до знаходження оптимального, з погляду критеріїв блискавкозахисту, співвідношення між зазначеними параметрами.

Під час встановлення інтервалу координації варто враховувати, що рівень допустимих впливів на ізоляцію  $U_{дон}$  пов'язаний з величиною випробувальної напруги за ГОСТ 1516.3-96. Для силових трансформаторів, зокрема, прийнято, що за типової форми імпульсного впливу рівень припустимих перенапруг визначається згідно з табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Допустимі рівні грозових перенапруг для силових трансформаторів і шунтувальних реакторів

Номінальна напруга, кВ	35	110	220	330	500	750
Випробувальна напруга повною хвилею, кВ	210	480	750	1050 (1200)*	1550 (1675)	2175 (2300)
Припустимі рівні грозових перенапруг, кВ	200	470	705	975 (1140)	1430 (1570)	1980 (2118)

\* Примітка: числа без дужок відповідають силовим трансформаторам, числа в дужках – шунтувальним реакторам.

Допустимі грозові перенапруги для зовнішньої ізоляції (високовольтних введів, роз'єднувачів, вимикачів, конденсаторів зв'язку) виявляються різними за різних тривалостей фронту імпульсу і визначаються за нижньою границею області розкиду їхніх вольт-

секундних характеристик. За відсутності експериментальних вольт-секундних характеристик використовується формула Горєва-Машкілейсона:

$$U(\tau) = \frac{U(\tau_2)}{\sqrt{1 + B\tau_1/\tau_2}} \sqrt{1 + B\frac{\tau_1}{\tau}}, \quad (2.2)$$

де  $B = \frac{D^2 - 1}{1 - D^2\tau_1/\tau_2}$ , причому  $D = \frac{U(\tau_1)}{U(\tau_2)}$ ;

$U(\tau_1)$  і  $U(\tau_2)$  – відомі імпульсні розрядні напруги для передрозрядного часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , наприклад, розрядна напруга за зрізаної хвилі 2 мкс і розрядна напруга під час впливу повного імпульсу ( $\tau_2 = 20$  мкс).

Кількість і розташування розрядників на підстанції спочатку приймається, виходячи з досвіду створення аналогічних схем підстанцій і з умови зручності їхнього розміщення на території ВРУ. Згодом виконується порівняння різних варіантів розміщення розрядників і вибір оптимального варіанта. Досвід розрахунків блискавкозахисту підстанцій показує, що в типових схемах розрядник здатний забезпечити блискавкозахист устаткування підстанції розташоване на віддалі від нього не більше, ніж 30-150 м, причому менші значення відповідають тупиковим підстанціям і розрядникам старих типів, а більші – прохідним підстанціям і ОПН.

Необхідні обмеження крутизни фронту набіжної хвилі досягаються завдяки наявності захищеного підходу лінії електропередачі. Хвиля під час руху по лінії деформується за рахунок імпульсної корони і втрат у проводах та на землю таким чином, що тривалість фронту збільшується приблизно пропорційно довжині пробігу. У розрахунках блискавкозахисту використовується така емпірична формула для оцінки збільшення тривалості фронту хвилі  $\Delta\tau_\phi$  (у мікросекундах) під час пробігу по ділянці лінії довжиною  $l_n$  (у кілометрах)

$$\Delta\tau_\phi = l_n \eta^{(-)}, \quad (2.3)$$

де  $\eta^{(-)}$  – коефіцієнт деформації фронту хвилі внаслідок імпульсної корони, що показує, на скільки мікросекунд подовжується фронт хвилі під час пробігу одного кілометра лінії.

Для хвиль від'ємної полярності з напругою, що перевищує напругу початку корони, коефіцієнт деформації фронту можна знайти за емпіричною формулою:



$$\eta^{(-)} = 3,33 \left[ \sqrt{1 + 0,6 \left( \frac{U}{U_K} - 1 \right)^{2/3}} - 1 \right], \quad (2.4)$$

де  $U_K$  — напруга початку коронування проводів лінії.

Необхідно відзначити, що в районах з високим питомим опором ґрунтів ( $\rho_3 \geq 1000$  Ом·м) деформація хвилі істотно залежить також від втрат у землі. Врахування цих втрат значно ускладнює розрахунок коефіцієнта деформації фронту, тому він повинен проводитися за допомогою ЕОМ.

Захист підходу лінії полягає в таких заходах:

- 1) підвищуванні блискавкозахисних тросів навіть у випадку їхньої відсутності на інших ділянках лінії;
- 2) зниженні кута тросового захисту  $\alpha \leq 20^\circ$  шляхом підвищування другого троса або зміни конструкції опори на підходах;
- 3) заземленні тросів на кожній опорі підходу;
- 4) зниженні опору заземлення опор на підході до значень  $R \leq 10 \dots 20$  Ом.

Крім того, за розташування проводів на лінії на різних висотах рекомендовано перейти на підходи до опор з горизонтальним розташуванням проводів, що мають меншу індуктивність.

На початку підходу ліній на дерев'яних опорах бажано встановити розрядник РВ1 (рис. 2.5) з малим опором заземлення для захисту точки з ослабленою ізоляцією. Цей розрядник також сприяє обмеженню амплітуди хвиль на початку захищеного підходу, завдяки чому знижується амплітуда струму в підстанційному розряднику. Наприкінці захищеного підходу, перед лінійним вимикачем, рекомендується також встановити розрядник РВ2. Він призначений для захисту ізоляції кінця лінії і вимикача від хвиль під час повторних розрядів блискавки. Вони можуть пройти, коли відключена вимикачем лінія не заземлена (наприклад, під час безструмової паузи АПВ, викликаній попереднім розрядом блискавки). Розрядник РВ2 приєднується до загального контуру заземлення підстанції.

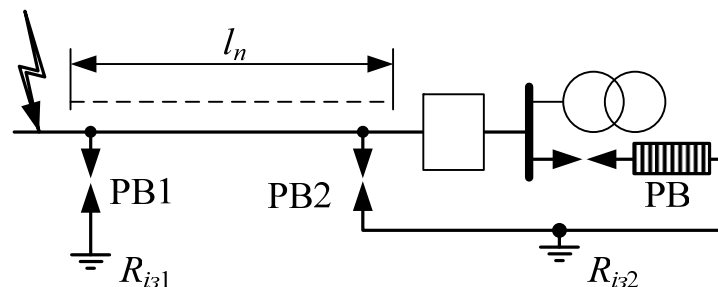


Рисунок 2.5 – Схема захищеного підходу лінії електропередачі

Довжина захищеного підходу  $l_n$  для кожного варіанта схеми визначається з урахуванням особливостей розвитку перенапруг у такій схемі під час набігання хвиль. Для цього спочатку будується так звана крива небезпечних хвиль (КНХ), що показує, для яких поєднань амплітуди і тривалості фронту набіжна хвиля буде в змозі викликати небезпечні перенапруги (рис. 2.6). Побудова кривої небезпечних хвиль вимагає проведення серії розрахунків перехідних процесів (*transient process*) у схемі за набігання хвиль із різними амплітудами і тривалостями фронту та відбору тих із них, під час яких перенапруги на трансформаторі або на іншому захищеному обладнанні досягають граничної припустимої величини  $U_{дон}$ .

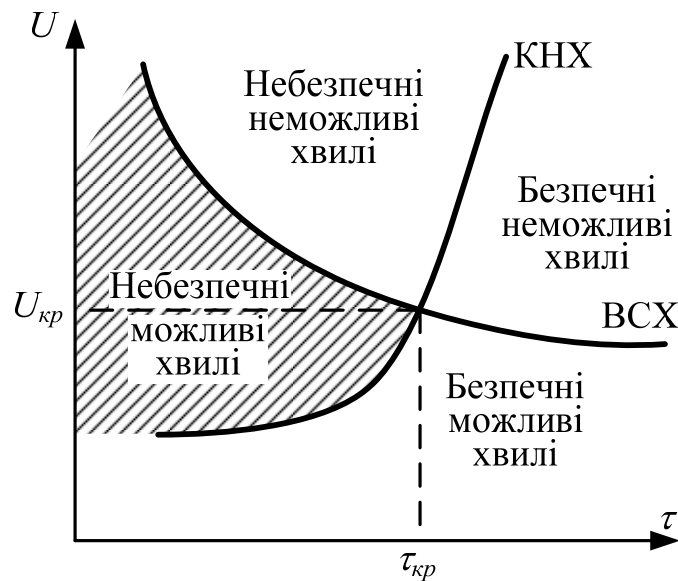


Рисунок 2.6 – Визначення критичної тривалості фронту хвилі для розрахунку довжини безпечного захищеного підходу лінії

Не всі із знайдених небезпечних поєднань амплітуди і крутизни (або тривалості фронту) набіжних хвиль можуть у дійсності спостерігатися на вході підстанції. Амплітуда набіжних з лінії хвиль не може перевищити значень імпульсного рівня лінійної ізоляції або пробивної напруги розрядника РВ1. Під час виникнення хвиль із амплітудою, що перевищує вказані значення, відбувається перекриття гірлянд лінійних ізоляторів або спрацьовування розрядника, що приводить до зниження амплітуди набіжної на підстанцію хвилі. Рівень обмеження амплітуди хвилі, відповідно до вольт-секундної характеристики розрядного проміжку, залежить від крутості хвилі (або тривалості фронту хвилі  $\tau_\phi$ ). Поєднавши на одному графіку вольт-секундну характеристику (ВСХ (*voltage-second characteristic*)) гірлянди ізоляторів (або розрядника на лінійному підході) і криву небезпечних хвиль підстанції, одержимо чотири області поєднання амплітуди  $U_\phi$  і тривалості фронту  $\tau_\phi$  набіжних із лінії хвиль.

Вище КНХ знаходиться область небезпечних хвиль, однак хвилі, які розташовані вище вольт-секундної характеристики, приходять на підстанцію з амплітудами й довжинами фронтів, обмеженими дією ВСХ. Всі хвилі, розташовані нижче КНХ, утворюють область безпечних хвиль. Як і в попередньому випадку, хвилі, що знаходяться вище ВСХ, будуть обмежені. Реальною небезпекою для підстанції є лише хвилі, розташовані вище КНХ, причому виконувати розрахунки перенапруг для обмежених дією ВСХ хвиль немає необхідності, але вони повинні бути враховані в оцінках статистики небезпечних впливів.

Загальною особливістю впливів є те, що тривалість фронту небезпечних хвиль  $\tau_{\phi}$  не перевищує значення абсциси точки перетину кривої небезпечних хвиль і вольт-секундної характеристики ізоляції на підході  $\tau_{кр}$  (див. рис. 2.6). Якщо вибрати таку довжину захищеного підходу лінії, за якої подовження фронту хвилі буде не менше ніж  $\tau_{кр}$ , то будь-яка хвиля, що виникла поза зоною захищеного підходу, після пробігу по підході стане безпечною для підстанції. Критична (мінімальна) довжина  $l_n$ , яка задовольняє цю умову, може бути розрахована за формулою:

$$l_{кр} = \tau_{кр} / \eta^{(-)}.$$

Захист підходу, навіть за використання всіх перерахованих заходів, не вдається зробити абсолютно надійним. Зберігається деяка імовірність прориву блискавки на проводи лінії та зворотних перекриттів у зоні захищеного підходу. Частина виниклих при цьому хвиль не встигає за час пробігу від місця удару блискавки до підстанції подовжити фронт до безпечної величини і викликає небезпечні перенапруги. Число таких хвиль буде залежати від надійності блискавкозахисту підходу лінії та від його довжини.

У тому варіанті схеми блискавкозахисту підстанції, де критична довжина захищеного підходу  $l_{кр}$  виявляється найбільшою, буде найбільшим і число небезпечних хвиль, що виникають внаслідок ураження лінії в зоні захищеного підходу, тому під час проектування схем блискавкозахисту прагнуть до того, щоб довжина підходу  $l_{кр}$  не перевищувала деякого граничного значення, а саме:

Лінія електропередачі, кВ	Довжина підходу, км
35	1–2
110	1–3
220	2–3
330	2–4
500	2,5–3

Якщо величина  $l_{кр}$  перевищує вказане значення, доцільно змінити тип, число або розташування розрядників на підстанції й спробувати знайти більш вдалий варіант схеми блискавкозахисту.

Як вже зазначено, небезпечні хвилі можуть прийти на підстанцію лише з ділянки підходу лінії довжиною  $l_{кр}$ . Удари блискавки в лінію поза цією ділянкою є безпечними для підстанції, тому для оцінювання середньорічного числа набігання небезпечних хвиль досить розрахувати лише очікуване число виникнення небезпечних хвиль під час ударів блискавки в ділянку лінії довжиною  $l_{кр}$ , що примикає до підстанції.

Для оцінювання надійності захисту від набіжних хвиль довжину критичного підходу  $l_{кр}$  ділять на велику кількість ділянок так, щоб у межах кожної ділянки  $\Delta l$  імовірність виникнення небезпечної хвилі під час прориву блискавки можна було б вважати незмінною. Потім для всіх точок підходу, що відповідають кінцям ділянок, будують криві небезпечних хвиль, які враховують деформацію хвиль під час пробігу від кінця ділянки до підстанції за рахунок імпульсної корони, втрат у землі, а також можливого імпульсного перекриття ізоляції лінії по ходу хвилі. За формулами, наведеними у розділі 1, визначають середньорічне число проривів блискавки  $N_{пр}$  по всій довжині критичного підходу  $l_{кр}$ . Якщо припустити, що прорив блискавки має однакову ймовірність виникнення на будь-якій ділянці  $\Delta l$  довжини критичного підходу, то можна вважати, що відношення  $\Delta l/l_{кр}$  дорівнює частці проривів у загальному числі  $N_{пр}$ , що припадає на одну ділянку.

Знаючи число проривів блискавки на ділянці  $\Delta N_{пр} = N_{пр} \cdot \Delta l/l_{кр}$  і криву небезпечних хвиль для цієї ділянки, можна розрахувати середньорічне число набігання небезпечних хвиль із цієї ділянки.

Визначивши число небезпечних хвиль із кожної ділянки, розраховують середньорічне число небезпечних хвиль шляхом підсумовування всіх знайдених значень  $\Delta n_k$ . Оскільки ця методика вимагає багаторазової побудови кривої небезпечних хвиль із урахуванням деформації хвилі під час пробігу певних відстаней до підстанції й багаторазового інтегрування ймовірності по області, що знаходиться вище кривих небезпечних хвиль, розрахунки можуть бути виконані лише з використанням обчислювальної техніки.

Можна, з деяким наближенням, розрахувати кількість небезпечних хвиль  $n_{нх}$ , побудувавши єдину криву небезпечних хвиль для підстанції (рис. 2.7) і зробивши лише двовимірне інтегрування, що істотно спрощує розрахунки. Відповідно до цього методу для кожного варіанта поєднання параметрів хвилі  $U_{хв}$  і  $\tau_{ф}$  потрібно визначити критичну довжину пробігу, після якого хвиля з даними параметрами деформується настільки, що стає безпечною. Розрахунки будуються, виходячи з таких міркувань. Хвилі з параметрами, що

розташовуються вище кривої небезпечних хвиль, але з амплітудою нижче рівня  $U_{кр}$  (область 1 на рис. 2.7), у міру їхнього просування до підстанції будуть відчувати деформацію фронту.

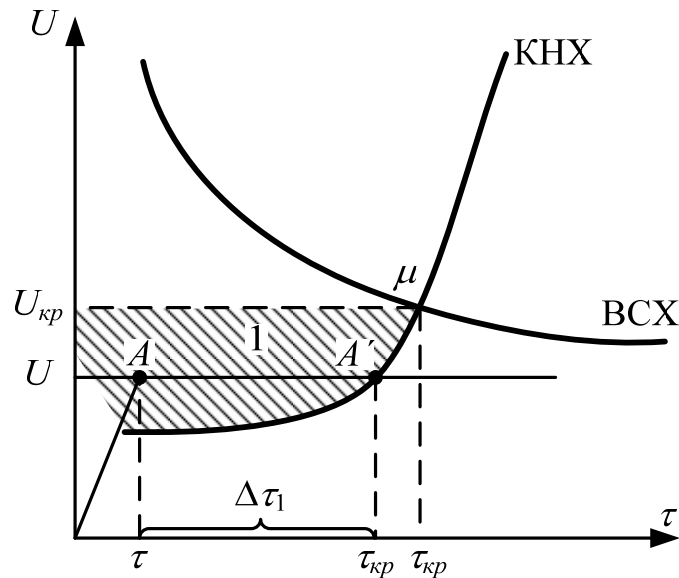


Рисунок 2.7 – Визначення необхідної деформації хвилі  $\Delta\tau_1$  для області 1

Після пробігу деякої відстані  $l_{01}$  фронт подовжиться настільки, що хвиля стане безпечною. Для цього необхідно, щоб точка  $A$ , розташована наприкінці фронту хвилі, перемістилася по горизонталі в точку  $A'$ , розташовану на кривій небезпечних хвиль. Величину необхідного для цього пробігу можна розрахувати, використовуючи формулу:

$$l_{01} = \Delta\tau_1 / \eta^{(-)}, \quad (2.5)$$

де  $\Delta\tau_1$  – необхідне подовження фронту (рис. 2.7).

Таким чином, кожному поєднанню амплітуди при  $U_{хв} \leq U_{кр}$  і тривалості фронту  $\tau_\phi$  хвилі відповідає певна довжина пробігу  $l_0$ , після якого хвиля стає безпечною. За заданого поєднання  $U_{хв}$  і  $\tau_\phi$  небезпечними для підстанції виявляються лише ті хвилі, які виникнуть на відстані від підстанції, що не перевищує  $l_0$ . Якщо вважати однаковою ймовірність влучення блискавки в будь-яку точку підходу довжиною  $l_{кр}$ , то можна визначити, яка частка від загального числа ударів блискавки в підхід, що приводять до появи хвиль із заданим поєднанням  $U_{хв}$  і  $\tau_\phi$ , буде небезпечна для підстанції.

$$P_{нх1} = l_{01}(U_{хв}, \tau_\phi) / l_{кр}. \quad (2.6)$$

Розглянемо далі область 2 параметрів хвиль, розташовану нижче вольт-секундної характеристики, але вище рівня  $U_{кр}$  (рис. 2.8). Ці хвилі будуть викликати перекриття гірлянд на опорах лінії, найближчих до точки удару блискавки, причому момент перекриття визначиться точкою перетину вольт-секундної характеристики з лінією спаду хвилі; після перекриття напруга хвилі швидко спадає до значень, обумовлених напругою на заземлювачі опори, що, звичайно, не є небезпечними для ізоляції.

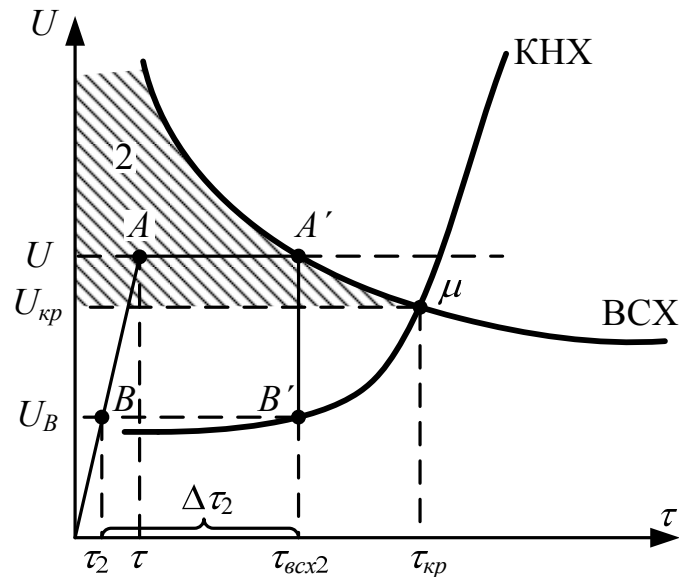


Рисунок 2.8 – Метод визначення  $\Delta\tau_2$  для області 2

Для того, щоб зробити безпечною таку зрізану на спаді хвилю, буде потрібна довжина пробігу, при якій точка  $B$  фронту хвилі на рівні напруги  $U_B$ , обумовлена точкою перетинання лінії спаду хвилі і кривою небезпечних хвиль, переміститься з початкового положення  $B$  у положення  $B'$  на кривій небезпечних хвиль (рис. 2.8). Необхідну довжину пробігу  $l_{02}$  у цьому випадку можна знайти з виразу:

$$l_{02} = \Delta\tau_2 / \eta^{(-)}, \quad (2.7)$$

де  $\Delta\tau_2$  визначається відповідно до рис. 2.8.

Для області 2 можна також знайти в кожному поєднанні частку хвиль, небезпечних для підстанції, за формулою, аналогічною (2.6):

$$P_{нх2} = l_{02} (U_{хв}, \tau_{\phi}) / l_{кр}. \quad (2.8)$$

Нарешті, розглянемо область 3 поєднань амплітуд і тривалості фронту хвиль, розташовану вище вольт-секундної характеристики

(рис. 2.9). Такі хвилі будуть зрізані на найближчих опорах ще на фронті, у точці перетину лінії початкового фронту хвилі з вольт-секундною характеристикою. У цьому випадку, згідно з рис. 2.9, необхідна довжина пробігу визначиться вимогою перемістити точку  $C$  фронту на рівні  $U_C$ , що встановлюється точкою перетину лінії зрізу хвилі та кривою небезпечних хвиль, у положення  $C'$ :

$$l_{03} = \Delta\tau_3 / \eta^{(-)}(U_C). \quad (2.9)$$

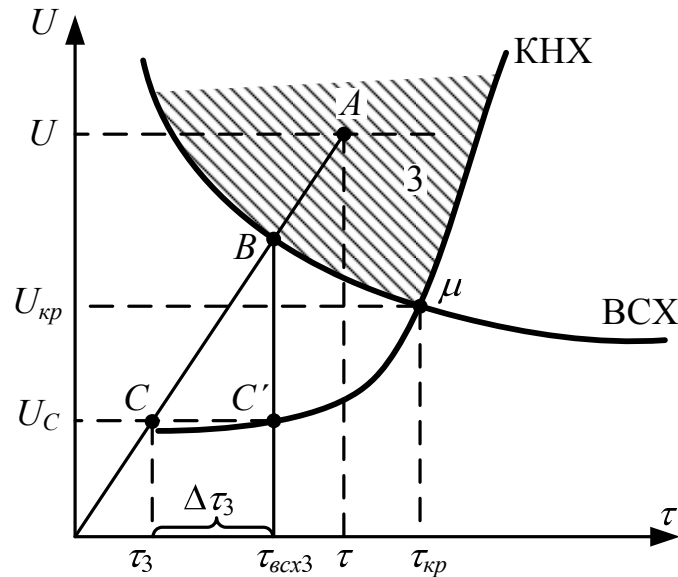


Рисунок 2.9 – Метод визначення  $\Delta\tau_3$  в області 3

За знайденим значенням  $l_{03}$  можна, як і в попередніх випадках, визначити умовну ймовірність ураження підстанції  $P_{hx3}$ .

Загальну ймовірність перевищення припустимого рівня перенапруг на підстанції під час прориву блискавки в зоні захищеного підходу можна знайти шляхом підсумовування  $P_{hx1}$ ,  $P_{hx2}$ ,  $P_{hx3}$ .

Аналогічним чином можна розрахувати й очікуване число появи небезпечних хвиль, викликаних зворотними перекриттями під час ударів блискавки в опори в зоні захищеного підходу, тільки при цьому потрібно враховувати особливості формування і деформації імпульсу хвилі під час зворотного перекриття.

Заходи захисту підстанції від грозових хвиль, що набігають із ліній електропередачі, забезпечують високу надійність її роботи. Так, наприклад, для типової схеми підстанції 220 кВ, що працює в тупиковому режимі, з відстанню між розрядником і трансформатором 90–120 м, розрахункове число відключень підстанції під час підходу небезпечних хвиль грозових перенапруг внаслідок проривів блискавки на проводи на підході лінії до підстанції становить:

$$\begin{aligned}
 n &= n_1 + n_2 + n_3 = \\
 &= (0,5 - 0,9) \cdot 10^{-3} + (0,5 - 1,2) \cdot 10^{-3} + (0,7 - 8,5) \cdot 10^{-5} \approx . \\
 &= (1,0 - 2,1) \cdot 10^{-3} \quad [1/\text{рік}]
 \end{aligned}$$

## 2.4 Блискавкозахист підстанцій різних класів напруги

Лінії електропередачі напругою 330 кВ і вище захищаються тросами по всій довжині. Для обмеження внутрішніх перенапруг на кінцях ліній 330 кВ і вище встановлюють шунтувальні реактори. За розімкнутого лінійного вимикача на них відбувається подвоєння напруги набіжних хвиль, тому для захисту реакторів на лінії поруч із ними встановлюються вентильні розрядники. Габарити відкритого розподільного пристрою на таких підстанціях не дозволяють забезпечити захист одним розрядником одночасно декількох силових трансформаторів, тому розрядники встановлюють біля кожного трансформатора або реактора. Часто розрядники встановлюють безпосередньо біля виводів трансформатора (до вимикача), оскільки за відключених обмоток ВН зберігається небезпека виникнення на них атмосферних перенапруг шляхом переходу з обмотки СН. Ця небезпека особливо підвищена для автотрансформаторів.

Регульовальні частини обмоток трансформаторів і автотрансформаторів, а також обмотки НН захищають спеціальними розрядниками.

У мережах 110–220 кВ реактори на лініях, як правило, відсутні, тому відпадає необхідність установа розрядників біля лінійного вимикача. Устаткування підстанцій цих класів напруги розташовується більш компактно, що дозволяє обмежитися встановленням одного комплекту розрядників на кожен систему шин. Однак на віддалених від шин трансформаторах (наприклад, на ГЕС) необхідно ставити додаткові розрядники. Крім того, у цих мережах підходи ліній повинні бути захищені блискавкозахисними тросами.

Деякі особливості має блискавкозахист підстанцій 3–20 кВ без електричних машин. Введення напруги на такі підстанції звичайно здійснюється за допомогою кабельних вставок, оскільки велику кількість повітряних ліній 3–20 кВ до підстанції підвести досить складно. Схема блискавкозахисту такої підстанції наведена на рис. 2.10. Оскільки така повітряна лінія має відносно слабку ізоляцію, практично будь-який удар блискавки в лінію приводить до трифазного перекриття ізоляції на землю. У результаті по всіх трьох фазах лінії передач до підстанції поширюються однакові хвилі перенапруг. У точці з'єднання повітряної лінії з кабелем відбувається відбиття й



заломлення хвиль. Оцінити величину заломленої хвилі можна через коефіцієнт заломлення:

$$\alpha = \frac{2Z_{\kappa}}{Z_{\kappa} + Z_{\lambda}}$$

де  $Z_{\kappa}$  і  $Z_{\lambda}$  - хвильові опори кабелю й лінії.

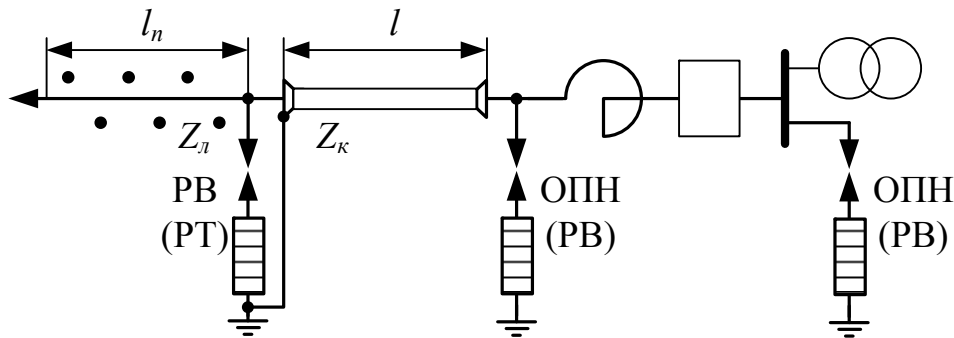


Рисунок 2.10 – Схема блискавкозахисту підстанції 3–20 кВ

Під час руху хвилі перенапруг по трьох фазах лінії передач напруга на проводі будь-якої фази (наприклад, А)  $U_A$  пов'язана зі струмами у фазах  $I_A$ ,  $I_B$  та  $I_C$  такою залежністю:

$$U_A = I_A Z_{A0} + I_B Z_{AB} + I_C Z_{AC},$$

де  $Z_{A0}$  – хвильовий опір фази А;

$Z_{AB}$  і  $Z_{AC}$  – взаємні хвильові опори фази А і фаз В та С.

Оскільки хвилі рухаються по всіх трьох фазах лінії, то її хвильовий опір дорівнює:

$$Z_{\lambda} = \frac{Z_A}{3} = \frac{Z_{A0} + 2Z_{AB}}{3}.$$

Наприклад, при  $Z_{A0}=400$  Ом і  $Z_{AB}=100$  Ом хвильовий опір  $Z_{\lambda}=200$  Ом.

Хвильовий опір кабелю під час руху хвилі по всіх трьох жилах  $Z_{\kappa}=10...15$  Ом. За таких значень  $Z_{\lambda}$  і  $Z_{\kappa}$  коефіцієнт заломлення:

$$\alpha = \frac{2 \cdot 10}{10 + 200} \approx 0,1 < 1.$$

Таким чином, обчислена за допомогою коефіцієнта заломлення напруга в кабелі виявляється в багато разів меншою.

Після багаторазового відбиття і заломлення хвиля напруги на підстанції наростає. При цьому через розрядники, встановлені на підстанції, після їхнього спрацювання можуть протікати надмірно великі струми й розрядники вийдуть із ладу.

Таким чином, наявність кабельної вставки на вході підстанції не забезпечує достатньої грозостійкості підстанції, тому в місці з'єднання повітряної лінії з кабельною встановлюють вентиляльний розрядник для обмеження набіжної хвилі.

Оболонка кабелю найкоротшим шляхом з'єднується із заземленням РВ. На підстанцію буде потрапляти напруга між жилою й оболонкою кабелю. Ця напруга складається зі спаду напруги на РВ і спаду напруги на індуктивності петлі провідника, що з'єднує оболонку кабелю із заземленням РВ, тому зменшення індуктивності з'єднувального провідника приводить до зниження перенапруг на устаткуванні підстанцій.

За малої довжини кабелю ( $l < l_{кр}$ ) доцільно встановити вентиляльний розрядник: він має більш пологі вольт-секундну характеристику і надійніше працює під час крутих хвиль. Звичайно  $l_{кр} \approx 100 \dots 150$  м.

Наприкінці кабелю за відключеного вимикача напруга під час приходу спадної хвилі подвоюється і можливе ушкодження кабельної муфти. Для обмеження таких перенапруг наприкінці кабелю встановлюється вентиляльний розрядник.

У схемах потужних підстанцій (3–35 кВ) з великим числом кабелів, що відходять, встановлюють фідерні реактори для обмеження струму короткого замикання (див. рис. 2.10). Для хвилі з крутим фронтом реактор являє собою розімкнутий кінець, тому встановлення РВ між реактором і кабелем є обов'язковим.

Для блискавкозахисту перемикального пункту (у мережах 6–10 кВ) на всіх лініях, звідки можливе живлення, розміщують ОПН. Наприклад, якщо живлення здійснюється по лінії 1 (рис. 2.11), а лінії 2 і 3 не мають джерел е.р.с, то ОПН встановлюють на лінії 1 поблизу перемикального пункту.

Іноді спорудження захищених підходів ліній до підстанції виявляється економічно недоцільним або неефективним. У цих випадках використовують спрощені схеми блискавкозахисту підстанції, у яких відсутність захищених підходів лінії частково компенсується встановленням додаткових вентиляльних розрядників, винесених на лінію. Такий захист використовується, зокрема, у тупикових схемах підстанції 35–220 кВ на відпайках від ліній електропередачі та у тимчасових схемах.

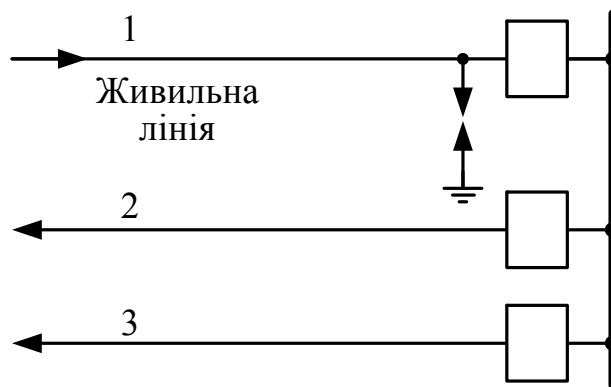


Рисунок 2.11 – Схема блискавкозахисту перемикального пункту 6–10 кВ

Головною умовою забезпечення надійного блискавкозахисту таких схем є максимальне наближення РВ або ОПН до захищеного обладнання, що можливо лише при невеликій кількості комірок на підстанції й компактному розташуванні устаткування. За рахунок близькості розрядника в значній мірі заглушується коливальна складова імпульсу грозових перенапруг, і його амплітуда стає близькою до амплітуди залишкової напруги розрядника. Однак, на відміну від нормальних схем, рівень залишкової напруги тут може перевищувати припустиму величину перенапруг внаслідок можливості ураження лінії поблизу підстанції. Якщо блискавка вдарила в провід ЛЕП у безпосередній близькості від підстанції, то перекриття лінійної ізоляції може не відбутися внаслідок захисної дії розрядника. По хвильовому опорі провідів ЛЕП при цьому відгалужується лише незначна частина струму блискавки й практично весь струм блискавки протікає через розрядник.

Струм через розрядник рідко перевищує 5 кА в мережах 110 і 220 кВ, 8 кА в мережі 330 кВ і 10...15 кА в мережах 500 і 750 кВ. У спрощених схемах струм через розрядник може сягати більших значень. За настільки високих струмів залишкова напруга розрядника виявляється вищою припустимої межі, і ізоляція підстанції може бути ушкоджена. Крім того, такі струми можуть ушкодити і сам вентиляційний розрядник. Все це обумовлює необхідність обмежити в схемах без захищеного підходу струм у підстанційному розряднику. Це досягається підключенням до мережі додаткових розрядників, що зменшують струм хвилі в землю крім підстанційного розрядника.

Підключення додаткових розрядників на підстанції, поруч із основним, було б малоефективним, оскільки навіть невелике розходження у вольт-амперних характеристиках, як показано на рис. 2.12, приводить до різкого нерівномірного розподілу струмів між розрядниками. Крім того, за близького розташування розрядників спрацьовування одного з них супроводжується зниженням напруги, що затрудняє спрацьовування другого розрядника.

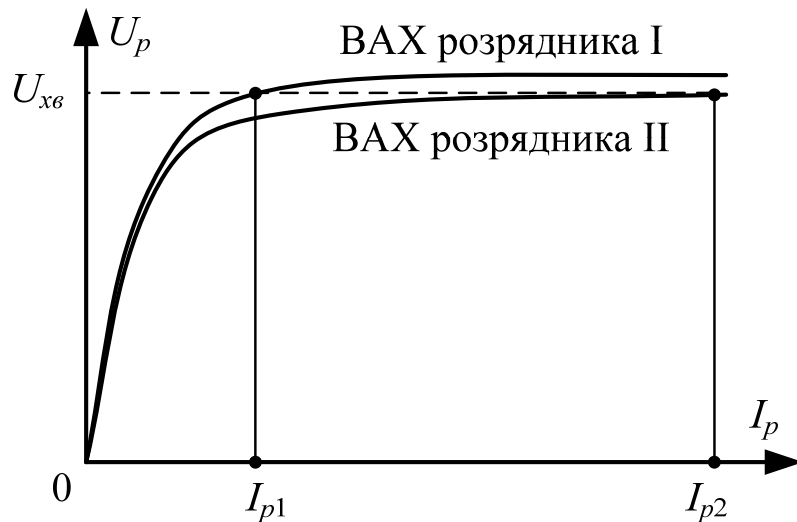


Рисунок 2.12 – Нерівномірний розподіл струму в паралельно включених розрядниках

Щоб додаткові розрядники працювали ефективно, їх підключають звичайно за один-два прогони до підстанції. Це створює підйом напруги на першому по ходу хвилі розряднику, що підвищує надійність його спрацювання.

Приклад розташування розрядників у спрощеному варіанті блискавкозахисту підстанції наведено на рис. 2.13. Спрощені схеми мають два недоліки, що знижують надійність блискавкозахисту в порівнянні з типовими схемами. По-перше, під час хвиль з пологим фронтом різниця в напругах у точках установлення розрядників може стати недостатньою і першим може спрацювати підстанційний розрядник.

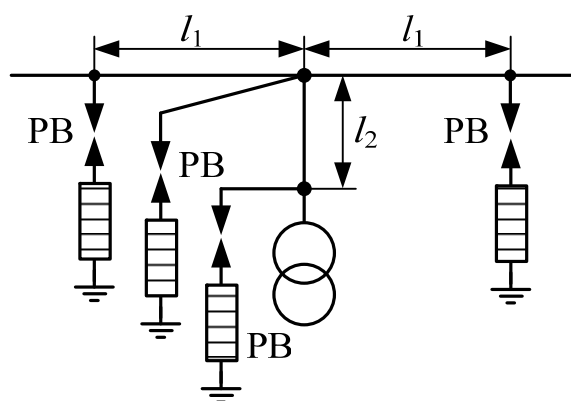


Рисунок 2.13 – Спрощена схема блискавкозахисту підстанції

Він захистить від пробою не тільки підстанційну ізоляцію, але й віддалений від нього лінійний розрядник, і обмеження струму в підстанційному розряднику не відбудеться. По-друге, відсутність захисту підходів робить можливими грозові ураження прогонів лінії

між розрядниками, що також може спричинити протікання більших струмів у підстанційному розряднику.

Під час вибору відстані між розрядниками необхідно враховувати, що надмірно велика відстань збільшує небезпеку влучення блискавки в прогони лінії між розрядниками, а при малих відстанях зростає небезпека відмови спрацьовування лінійного розрядника. Розрахунки показують, що оптимальні умови відповідають розміщенню розрядників на відстані 150–300 м.

## 2.5 Блискавкозахист електричних машин

Блискавкозахист електричних машин (генераторів, синхронних компенсаторів і високовольтних електродвигунів (*electric motor*)) має свої особливості:

а) рівень електричної ізоляції машин, що були тривалий час в експлуатації, значно нижчий, ніж іншого електрообладнання;

б) відсутні вентиляльні розрядники або ОПН, які змогли б забезпечити досить високу надійність захисту такої ізоляції від перенапруг;

в) грозові ушкодження ізоляції електричної машини досить значні, тому що через місце пробою ізоляції машини продовжує протікати аварійний струм за рахунок е.р.с. залишкового намагнічування навіть після зняття збудження машини, відключеної від мережі;

г) вихід з ладу електричних машин призводить до великого економічного збитку.

З урахуванням вказаних особливостей для надійного блискавкозахисту електричних машин доводиться вживати спеціальних заходів. Зокрема, на підході лінії встановлюють додаткові розрядники, що відводять частину струму набіжної хвилі у землю знижуючи в такий спосіб імпульсну напругу на машині. Крім того, використовується захисна дія кабельних вставок на підходах. Щоб знизити крутизну фронту імпульсів перенапруг на затискачах машини, паралельно з нею підключають конденсатори. Зниженню крутизни фронту сприяють також фідерні реактори, встановлені для обмеження струмів короткого замикання.

Схеми блискавкозахисту електричних машин, безпосередньо зв'язаних з повітряною мережею, зазвичай містять комплекс таких захисних засобів: ОПН або вентиляльний розрядник і малоіндуктивний конденсатор на шинах; захищений підхід повітряної лінії  $l_n$ , ОПН або розрядники на підході лінії, струмообмежувальний реактор і кабельну вставку (рис. 2.14).

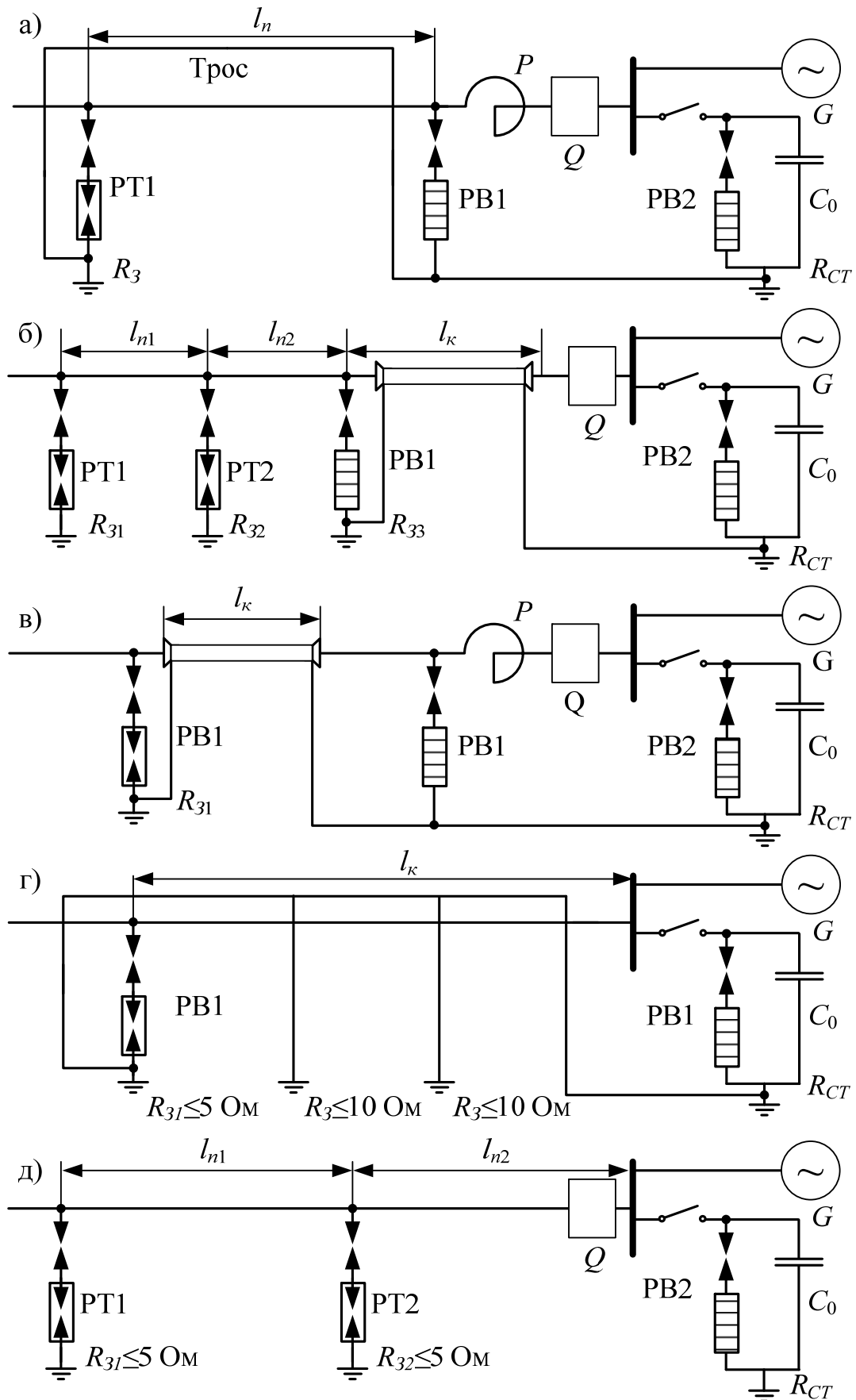


Рисунок 2.14 – Схеми блискавкозахисту електричних машин, безпосередньо підключених до повітряної мережі

Розрядники РВ1 і РВ2, встановлені по ходу руху хвиль грозкових перенапруг, призначені для відведення частини струму хвилі в землю й обмеження струму в ОПН або вентиляльному розряднику, встановленому на електричній машині. Їхня ефективність залежить від величини опору заземлення, достатня для практики надійність роботи схеми забезпечується при  $R_3 \leq 10$  Ом. Оптимальна довжина захищеного підходу  $l_n$  становить 100–150 м. Для захисту підходу від прямих ударів блискавки використовуються блискавкозахисні трости. Реактор  $P$  у схемі рис. 2.14 згладжує фронт імпульсу перенапруг на шинах, а також полегшує умови спрацювання розрядника РВ1.

Ємність  $C_0$  на шинах призначена для ліквідації коливальної складової напруги на затискачах машини. Звичайно тривалість фронту імпульсу  $\tau_\phi$  грозкових перенапруг на затискачах машини за рахунок малоіндуктивної ємності  $C_0$  збільшується до 20–50 мкс.

Показник надійності схеми блискавкозахисту машини за рис. 2.14,а становить  $\sim 35$  років без врахування спрацювання розрядника на протилежному кінці лінії невеликої довжини ( $l_n \leq 1 \dots 2$  км).

Спрацювання розрядників, встановлених на протилежному кінці лінії, значно покращує показник надійності: у цьому випадку він становить  $\sim 70$  років.

У схемі рис. 2.14,б новим елементом є кабельна вставка, що відокремлює повітряну лінію від шин з електричною машиною. Її захисна роль не обмежується додаванням додаткової ємності, що згладжує хвилю. Кабельна вставка служить для відведення значної частки струму хвилі в землю поза шинним розрядником. Це досягається в такий спосіб. Під час спрацювання розрядника РВ1 на вході кабельної вставки жила кабелю виявляється з'єднаною паралельно з його оболонкою (через динамічний опір РВ1). Внаслідок великої швидкості зміни напруги хвилі її рух по кабелю супроводжується проявом поверхневого ефекту. Струм хвилі витісняється з жили на оболонку кабелю, що має контакт із землею, і йде в землю, минаючи шини підстанції.

Достатня для практики надійність вимагає, щоб довжина кабельної вставки  $l_k$  становила не менше 30 м, а захищеного повітряного підходу  $l_{n1} \approx l_{n2}$  – не менше 100 м. При цьому опори заземлення  $R_{31}$ ,  $R_{32}$ , і  $R_{33}$  не повинні перевищувати 5–10 Ом. Відповідно до досліджень показник надійності блискавкозахисту за схемою рис. 2.14,б становить не менше 20 років.

На практиці найчастіше застосовується схема рис. 2.14,в, що містить одночасно струмообмежувальний реактор і кабельну вставку. При цьому забезпечується найвища надійність блискавкозахисту електричних машин, гальванічно пов'язаних з повітряною мережею

(порядку 100 років), якщо довжина кабелю  $l_k$  не менше 50 м, а опір заземлення вентильного розрядника РВ1 не більше 5 Ом.

Зі всіх схем блискавкозахисту електричних машин найменшу надійність мають схеми рис. 2.14,г та рис. 2.14,д, коли машина безпосередньо підключена до повітряної мережі.

Завдання блискавкозахисту набагато спрощується, якщо електрична машина приєднується до повітряної мережі не безпосередньо, а через трансформатор. У цьому випадку трансформатор значно обмежує амплітуду і крутизну імпульсів грозових перенапруг на затискачах машини.



### 3 ВНУТРІШНІ ПЕРЕНАПРУГИ ТА ЇХ ОБМЕЖЕННЯ

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 нейтраллями.

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.

В процесі викладання матеріалу приділяється увага напрузі, що відновлюється на контактах вимикачів. Хоча ця напруга і не є перенапругою у власному сенсі цього слова, вони об'єднані як в реально протікаючому процесі, так і методикою експериментальних і аналітичних досліджень.

### 3.1 Аналітичні методи дослідження перенапруг

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

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

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

$$\tau = \omega_s t,$$

де  $\omega_s$  – кругова синхронна частота,  $\text{с}^{-1}$ ;

$t$  – 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  $U_{\phi}$ . Тому напруга, зокрема перенапруга, у відносних одиницях рівна

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

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

Зазвичай, другою базисною електричною величиною вибирається або хвильовий опір лінії  $z$ , або номінальний струм трансформатора  $I_{\text{н.тр}}$ , 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
$U_{\text{баз}} = U_{\phi}$	$U_{\text{баз}} = U_{\phi}$
$z_{\text{баз}} = z_{\phi}$	$I_{\text{баз}} = I_{\text{н.тр}}$
$I_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{z_{\text{баз}}} = I_{\text{нат.л.}}$	$z_{\text{баз}} = \frac{U_{\text{баз}}}{I_{\text{баз}}}$
$P = U_{\text{баз}} \cdot I_{\text{баз}} = P_{\text{нат.л.}}/3$	$P = U_{\text{баз}} \cdot I_{\text{баз}} = P_{\text{ном.тр.}}/3$

де  $P_{нат.л.}$  – натуральна потужність (*capacity, power*) лінії;

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

У розрахунки перехідних процесів входять індуктивності  $L$  і ємності  $C$ . Оскільки в системі відносних одиниць синхронна частота  $\omega_{s*} = 1$ , то  $x_* = \omega_{s*} L_* = L_*$  і  $b_* = \omega_{s*} C_* = C_*$ , тобто, кількісне значення індуктивного опору та індуктивності, як і ємнісної провідності і ємності, збігаються.

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

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

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 (*rotation(al) rate*) 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  $\omega_{дж}$  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  $\omega_s = 1$ ;  $L = x$ ;  $C = b$ ;  $U = \omega \Psi$ .

### 3.1.2 Перехідний процес в $r$ , $x$ , $b$ – коливальному контурі, прототипі досліджуваних електричних систем

Комутаційні перенапруги розвиваються в схемах, які часто вдається спростити до простого коливального контуру (*oscillating circuit; oscillating loop*) з параметрами  $r$ ,  $x$ ,  $b$ . Будь-які комутаційні перемикання в такому контурі, наприклад, увімкнення контуру або від'єднання від будь-якого зовнішнього джерела, призводять до перехідного процесу, що залежить від фази комутації і початкових умов – напруги  $U_0$  на ємності та струму  $I_0$  в індуктивності. Як відомо з теоретичних основ електротехніки, початкові  $U_0$  і  $I_0$  можна розглядати як самостійні джерела. Зручно розраховувати перехідний процес в контурі окремо для кожного із джерел, а потім використати принцип накладання. Найчастіше функцією, яка цікавить нас в перехідному процесі, є напруга на ємності.

Перехідний процес під впливом джерела синусоїдальної е.р.с.  $e = E \cos(\tau + \psi)$ .

Напруга на ємності коливального контура складається із напруг усталеного режиму  $u_{уст}$  та вільних коливань  $u_\epsilon$ .

Напруга  $u_{уст}$  – гармонічна функція з частотою джерела. Напруга  $u_\epsilon$  — загасаюче коливання з коефіцієнтом загасання  $\delta$  і власною частотою:

$$\Omega_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

$$\text{де } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{xb}} \text{ і } \delta = \frac{r}{2x}.$$

Функція напруги на ємності має вигляд:

$$u_c = u_{уст} + u_\epsilon = U_{уст} \left\{ \sin(\tau + \psi - \varphi) - e^{-\delta\tau} \left[ \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\sin \alpha} \sin(\Omega_0\tau + \alpha) + \frac{1}{\Omega_0} \cos(\psi - \varphi) \sin \Omega_0\tau \right] \right\}, \quad (3.1)$$

$$\text{де } \frac{U_{уст}}{E} = f\left(\frac{1}{\omega_0}\right) \text{ при різних } \frac{\delta}{\omega_0}.$$

У цій формулі:

$$U_{ycm} = \frac{E}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{2\delta}{\omega_0^2}\right)^2}} = E \frac{\frac{1}{b}}{\sqrt{\left(x - \frac{1}{b}\right)^2 + r^2}};$$

$$\alpha = \arctg \frac{\omega_0}{\delta}; \quad \varphi = \arctg \frac{1 - 1/\omega_0^2}{\frac{2\delta}{\omega_0^2}}.$$

Всі величини наведено у відносних одиницях ( $\omega_s = 1$ ).

На рис. 3.1 показано криві  $U_{ycm}/E$  в залежності від відношення вимушеної ( $\omega_s = 1$ ) і власної ( $\omega_0$ ) частот контуру при різних значеннях коефіцієнта  $\delta/\omega_0$ .

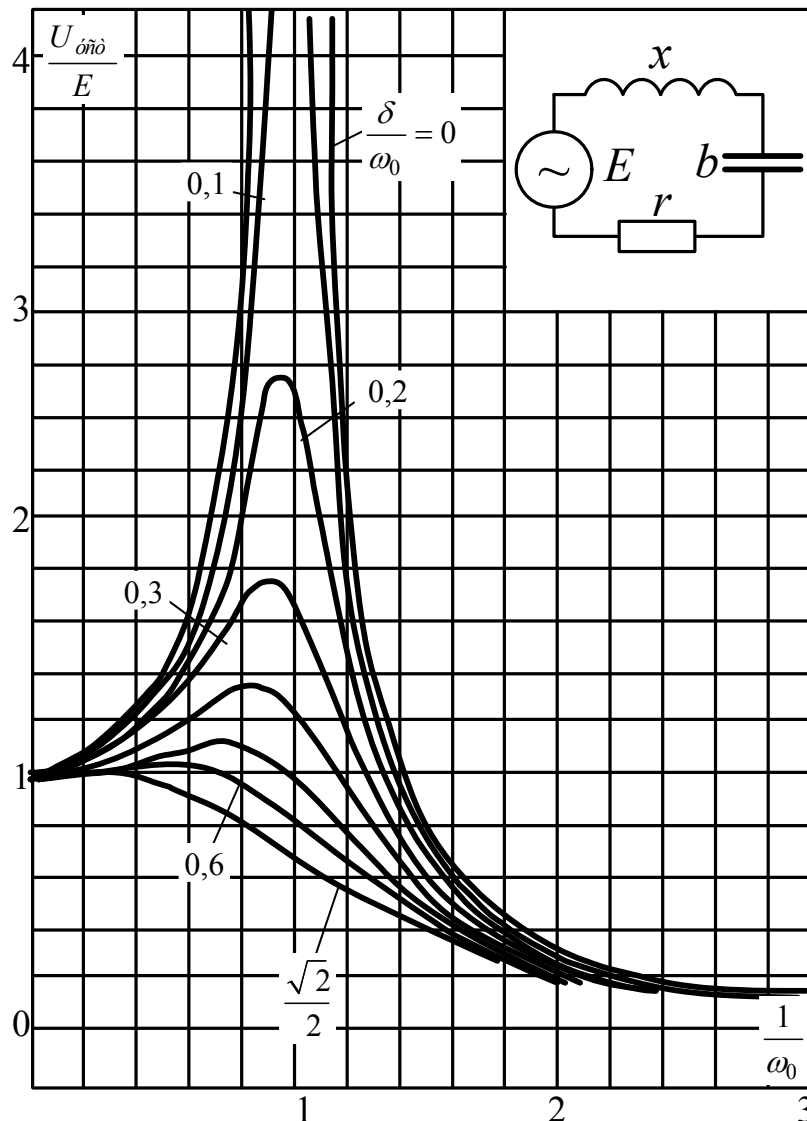


Рисунок 3.1 – Схема коливального контуру і резонансні криві

Ці криві називаються резонансними. Поблизу резонансної частоти  $\omega_0 = 1$  виникає пік напруги, величина якого обернено пропорційна відношенню  $\delta / \omega_0$ .

Кола електричних систем, як правило, мають малі втрати, тому  $\delta < \omega_0$ . У цих колах резонансний пік має гостру форму, а далеко від резонансу можна знехтувати впливом складової  $\delta / \omega_0$  на амплітуди коливань. Тому далеко від резонансу можна прийняти  $\Omega_0 = \omega_0$ ;  $\varphi \approx \arctg \infty = \frac{\pi}{2}$  і  $\alpha \approx \arctg \infty = \frac{\pi}{2}$ , тоді вираз (3.1) набуває вигляду:

$$u_c = -U_{уст} \left\{ \sin(\tau + \varphi) - \left[ \cos \varphi \cos \omega_0 \tau - \frac{1}{\omega_0} \sin \varphi \sin \omega_0 \tau \right] e^{-\delta \tau} \right\}, \quad (3.2)$$

де

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

*Перехідний процес під впливом початкової напруги  $U_0$  на ємності*

Під впливом цієї напруги відбувається коливальний загасаючий розряд, що виражається формулою:

$$u_c = U_0 \frac{\omega_0}{\Omega_0} \sin(\Omega_0 \tau + \chi) \cdot e^{-\delta \tau}, \quad (3.3)$$

де

$$\chi = \arcsin \frac{\Omega_0}{\omega_0}.$$

У контурі з малими втратами можна прийняти

$$\Omega_0 = \omega_0;$$

$$\chi \approx \arcsin 1 = \frac{\pi}{2},$$

отже:

$$u_c = U_0 \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}. \quad (3.4)$$

*Перехідний процес під впливом початкового струму  $I_0$  в індуктивності*

Під впливом початкового струму  $I_0$  перехідний процес в контурі також має коливальний загасаючий характер. Напруга на ємності виражається формулою:

$$u_c = i_0 \sqrt{\frac{x}{b}} \sin \Omega_0 \tau e^{-\delta \tau}, \quad (3.5)$$

або для електричного кола з малими втратами:

$$u_c = i_0 \sqrt{\frac{x}{b}} \sin \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}. \quad (3.6)$$

### **3.1.3 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 (як, втім, і початкових струмів коротких замикань) враховуються надперехідні реактивні опори, які у машин з демпферними контурами в обох осях приблизно однакові для систем струмів прямої і зворотної послідовностей.

За умови  $z_1 = z_2$  розрахунок напруг і струмів в несиметричних схемах може ґрунтуватися на універсальній комплексній схемі у фазних координатах, побудова якої показана на рис. 3.2. З обох боків від довільної несиметричної комутації, умовно показаній на рис. 3.2,а блоком НК, включені мережі  $S_1$  і  $S_2$  довільного вигляду з довільними перехідними опорами.

На схемі показано заземлення в місці комутації. За методом активного двополюсника для трифазної мережі можна перетворити  $S_1$  і  $S_2$  до схеми на рис. 3.2,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 (*tickover; idling*));  $z_1$  – еквівалентний опір прямої послідовності, рівний фазним опорам в симетричному режимі з точок  $a, b, c$  при закорочених джерелах е.р.с.



(опір короткого замикання);  $z_N = \frac{z_0 - z_1}{3}$  – опір в нульовому каналі;  $z_0$  – еквівалентний опір нульовій послідовності (*null sequence*).

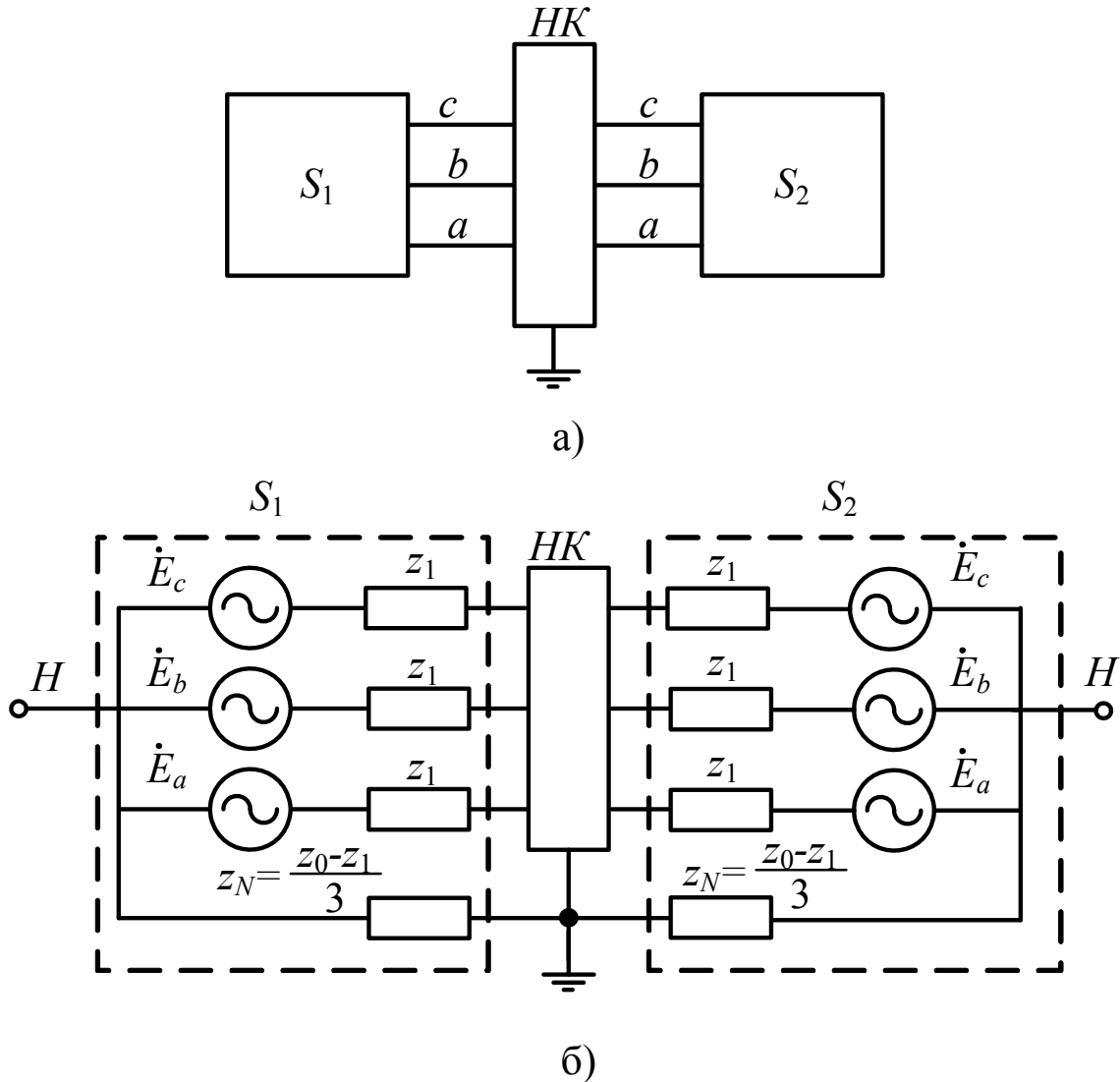


Рисунок 3.2 – Універсальна комплексна схема:  
а - початкова; б - розрахункова

За схемі на рис. 3.2,б опір  $z_0$  рівний потрійному опору з точок  $a$ ,  $b$ ,  $c$  при паралельно з'єднаних фазах:

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

Ця тотожність підтверджується правильністю структури схеми на рис. 3.2,б. Таким чином, в цій схемі виконуються необхідні та

достатні умови зв'язку між симетричними складовими напруги і струму.

Універсальна комплексна схема на рис. 3.2 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.

### 3.1.4 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 – заміщаються своїми реактивними опорами. Частотні характеристики цих елементів лінійні:

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


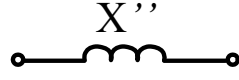


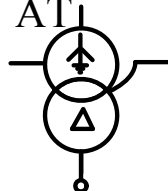
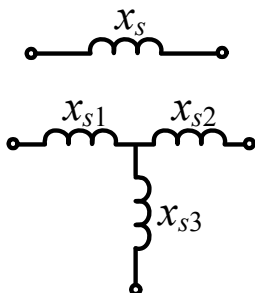
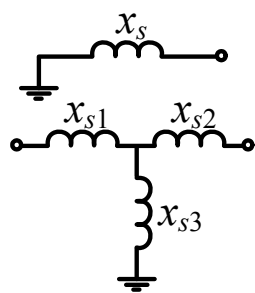
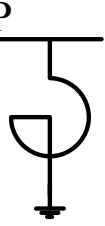
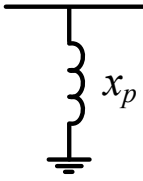
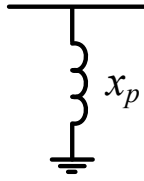
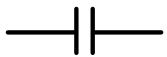
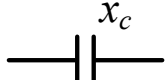
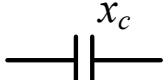
де  $\omega$  – кругова частота виражена в частках від частоти;

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

Джерела напруги (е.р.с.) задаються симетричними трійками векторів прямої послідовності. У табл. 3.2 наведено значення реактивних опорів у каналах прямої і нульової послідовностей для елементів схем — генераторів Г, трансформаторів Т, автотрансформаторів АТ, реакторів поперечної компенсації Р, емностей 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 		
Т  АТ 		
Р 		
ПК 		

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

Лінія задається своїми геометричними розмірами (рис. 3.3) і середньою питомою провідністю землі  $\gamma$  (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

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

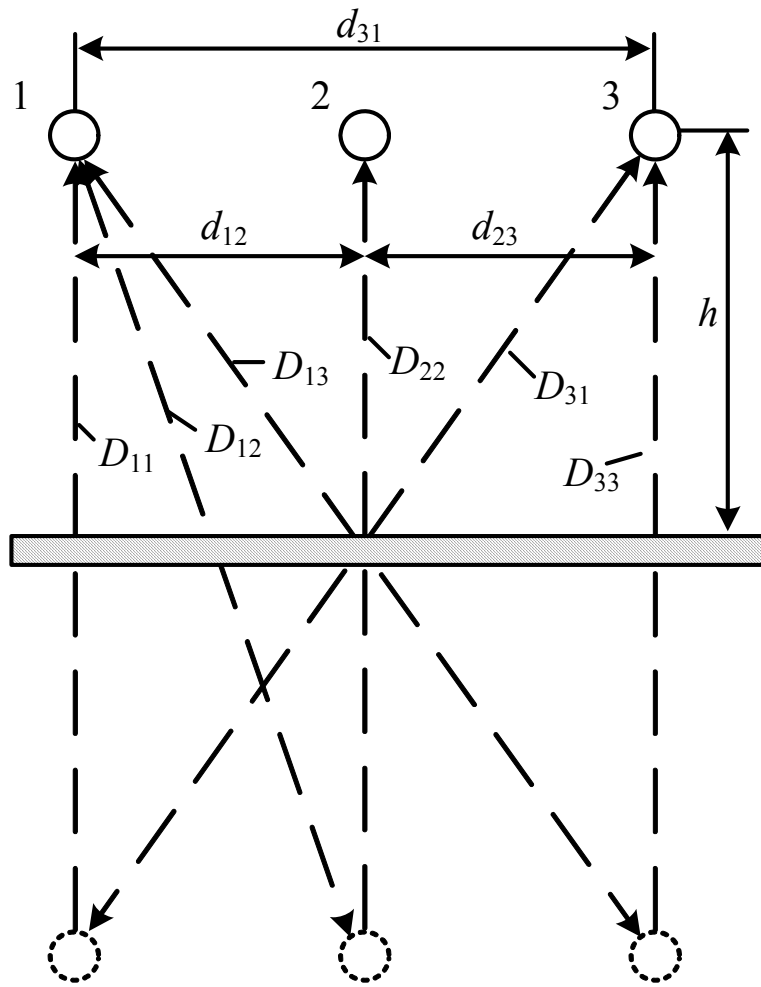


Рисунок 3.3 – Геометричні розміри лінії

- середньгеометрична відстань між проводом і дзеркальним відображенням інших проводів

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

- відстань до еквівалентного зворотного “проводу”, який імітує землю під час розрахунку нульової послідовності:

$$D_3 = \frac{0.21}{\sqrt{\gamma \cdot f \cdot 10^{-9}}} ;$$

- середньгеометричні розміри всіх проводів

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

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

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

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

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

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

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

На лінії з ідеально провідною землею електричні і магнітні поля зосереджені в повітрі та є дуальними. На такій лінії  $v_1 = v_0 = c$  ( $c$  – швидкість світла). Внаслідок розділення електричних і магнітних полів на лінії з реальною землею, що має кінцеву провідність  $\gamma$ , 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 власні  $z$  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 триси знижують індуктивні опори і підвищують ємнісну провідність ліній. Проте на сучасних ПЛ вищої напруги триси зазвичай розземляють. В цьому випадку справедливі розрахункові формули ліній без тросів, наведені в табл. 3.3.

У табл. 3.4 наведено типові параметри ліній електропередачі 500 кВ з горизонтальним розташуванням проводів, обчислені для ґрунтів з середнім питомим опором  $\rho = 10^2$  Ом·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	$2,95 \cdot 10^5$	$1,97 \cdot 10^5$

### 3.2 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  $\omega$ , яка еквівалентує дії внутрішньої

перенапруги (часто беруть  $\omega = \omega_s = 1$ ). На цій частоті електрична довжина лінії рівна  $\lambda$ . Параметри Т-подібної схеми обчислюються за формулами:

$$x = z \cdot \sin \frac{\lambda}{2}; \quad b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \lambda; \quad (3.7)$$

параметри П-подібної схеми – за формулами:

$$x = z \cdot \sin \lambda; \quad b = \frac{1}{z} \operatorname{tg} \frac{\lambda}{2}. \quad (3.8)$$

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

для Т-подібної схеми:

$$x = \frac{\lambda}{2}; \quad b = \lambda; \quad (3.7,a)$$

П-подібної схеми:

$$x = \lambda; \quad b = \frac{\lambda}{2}. \quad (3.8,a)$$

Схеми заміщення з параметрами згідно з формулами (3.7) або (3.8) достатньо точно заміщають лінію на частоті  $\omega$ , для якої визначені параметри  $x$  і  $b$ , і приблизно справедливі для розрахунку перехідних процесів в схемах, в яких комутаційні хвилі мають достатньо пологий фронт.

### 3.3 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. 3.4,а наведено структурну схему мережі, в якій відбулося однофазне коротке замикання. Побудуємо для неї універсальну комплексну схему. Така схема показана на рис. 3.4,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.

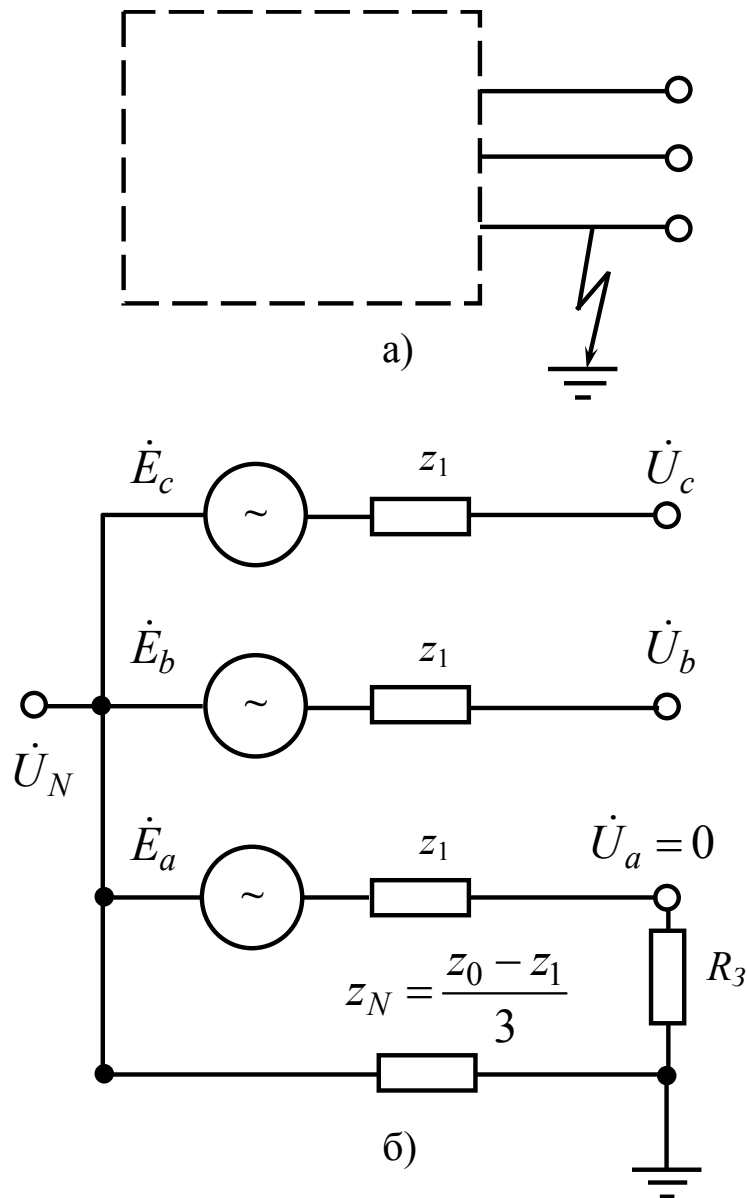


Рисунок 3.4 – Універсальна комплексна схема для несиметричної комутації – однофазного короткого замикання:  
а) початкова схема; б) розрахункова схема

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:



$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= 0 \\ \dot{U}_b &= \dot{E}_a \frac{(a^2 - 1)\frac{z_0}{z_1} + (a^2 - a) + a^2 \frac{3R_3}{z_1}}{2 + z_0/z_1 + \frac{3R_3}{z_1}} \\ \dot{U}_c &= \dot{E}_a \frac{(a - 1)\frac{z_0}{z_1} + (a - a^2) + a \frac{3R_3}{z_1}}{2 + z_0/z_1 + \frac{3R_3}{z_1}} \end{aligned} \quad (3.9)$$

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. 3.5 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  $R_\zeta = 0$ . 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  $c$  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  $k_\zeta$ .

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 (3.9), знаходимо:

$$k_\zeta = \frac{U_{b,c}}{E} = \left[ 1 + e^{\pm j\frac{\pi}{3}} \left( 1 - \frac{3x_1}{2x_1 + x_0} \right) \right] = \left[ 1 + e^{\pm j\frac{\pi}{3}} \left( 1 - \frac{I_{к.з.}^{(1)}}{I_{к.з.}^{(3)}} \right) \right], \quad (3.10)$$

де  $I_{к.з.}^{(1)}$  і  $I_{к.з.}^{(3)}$  – значення струмів однофазного і трифазного короткого замикання в точці комутації. Формула (3.10) зручна в розрахунках, оскільки струми короткого замикання в мережах зазвичай відомі. Формули (3.10) відповідають кривій  $r_0/x_1=0$  в правій області рис. 3.5.

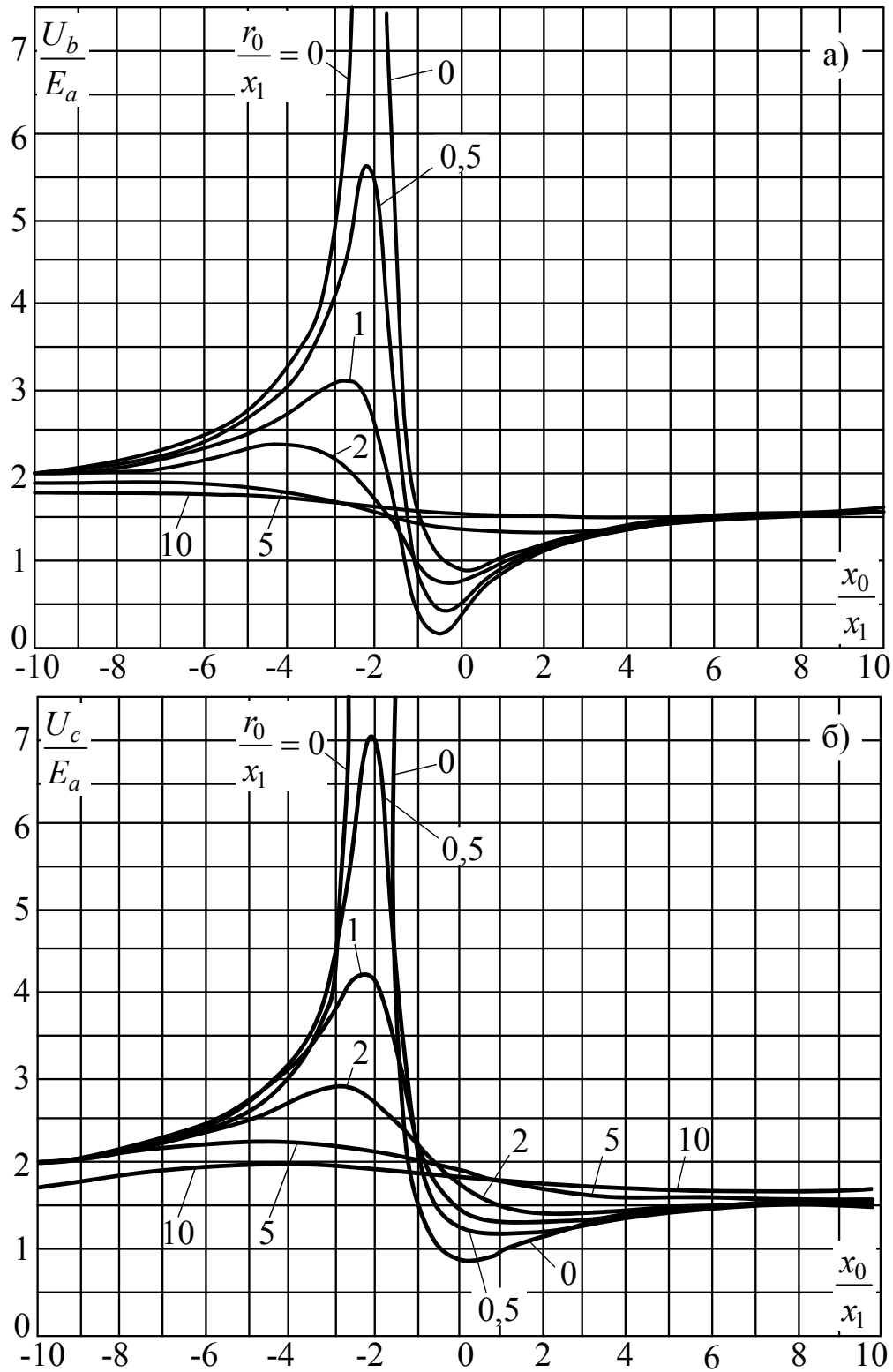


Рисунок 3.5 – Криві залежності напруги на здорових фазах  $b$  і  $c$  від відношення  $x_0/x_1$  для різних  $r_0/x_1$  при однофазному короткому замиканні на фазі,

а) криві  $\frac{U_b}{E_a} = f\left(\frac{x_0}{x_1}\right)$ ; б) криві  $\frac{U_c}{E_a} = f\left(\frac{x_0}{x_1}\right)$ ;  $z_1=0+jx_1$ ;  $z_0=r_0+jx_0$

Області ефективно заземленої нейтралі відповідають значення  $x_0/x_1 \leq 3$ . За кривими на рис. 3.5 або за формулою (3.10) 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  $0,8U_{л} = 1,38U_\phi$ .

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. 3.5 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. 3.5 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  $k_3 = 1$ .

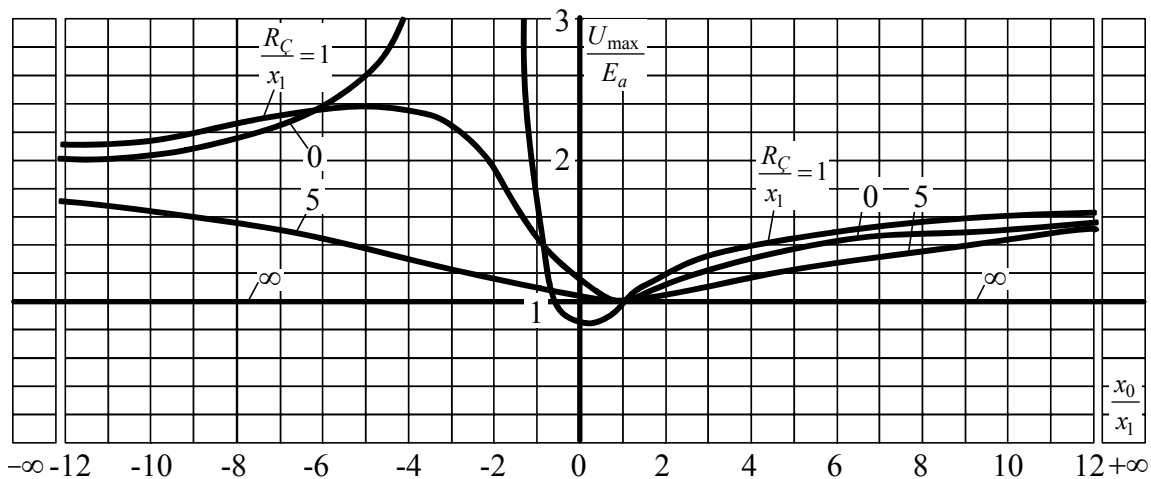


Рисунок 3.6 – Криві залежності максимальної напруги на здорових фазах від відношення  $x_0/x_1$  для різних  $R_3/x_1$  при однофазному короткому замиканні,  
 $z_1 = 0 + jx_1$ ;  $z_0 = 0 + jx_0$

### 3.4 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  $U_\phi$  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

$$U_{уст} = k_c E. \quad (3.11)$$

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

$$U_{уст} = k_3 k_c E. \quad (3.11,а)$$

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

$$U_{уст} = k_{уст} E, \quad (3.11,б)$$

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,

$$U_{пер} = k_{уст} k_{уд} E. \quad (3.12)$$

## **4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПЕРЕНАПРУГ В ДІЮЧИХ МЕРЕЖАХ**

Найбільш цінний матеріал про внутрішні перенапруги дають їх вимірювання в діючих мережах. Одним з видів таких вимірювань є дослідження, що проводяться в ході спеціально запланованих комутацій у виділених ділянках мережі за підготовленими програмами. Зазвичай ці дослідження проводяться при впровадженні електропередач нового вищого класу номінальної напруги, або нового устаткування, або нових схем виконання електропередач. 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 перенапруги, що виникають при запланованій комутації, або їх статистичні характеристики.

Інший вид вимірювань полягає в масовій реєстрації внутрішніх перенапруг в експлуатації за допомогою автоматичних катодних осцилографів чи іншої, більш простої, вимірювальної апаратури, яка реєструє тільки амплітуди перенапруг. Ці дослідження проводяться в багатьох країнах. В Україні вони широко поставлені в енергосистемах (*power supply system*) 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 налаштувати режими осцилографування і здійснювати оперативний перегляд, а також вимірювання параметрів перехідних процесів.

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

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

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

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

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

1) у вигляді двох рівнів. Нижній рівень утворюють реєстратори аналогових і дискретних сигналів, розподілені по об'єкту. Число реєстраторів визначається кількістю аналогових і дискретних сигналів, що підлягають обробці. Верхній рівень складається з ПЕОМ, модема і блока автоматичного запуску. Реєстратори з'єднуються з верхнім рівнем через послідовний інтерфейс;

2) у вигляді локальної мережі.

Базовим елементом інформаційно-діагностичного комплексу “Регіна” є реєстратор аналогових і дискретних сигналів (рис. 4.1). Реєстратор фіксує електричні сигнали змінного (*alternating current*) і постійного струмів (*direct current*), напруги (*dc voltage; direct voltage*), а також дискретні сигнали типу «сухий контакт» або потенційні.

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

Аналогові сигнали від трансформаторів струму і напруги контрольованих об'єктів надходять на входи блоків вимірювальних перетворювачів, де вони перетворюються до вигляду, необхідного для



введення в мікро-ЕОМ. Дискретні сигнали з вільних контактів пристроїв релейного захисту і автоматики, герконів (рис. 4.1), а також сигнали потенційного рівня логічних елементів цих пристроїв надходять на діодну матрицю і передаються в реєстратор.

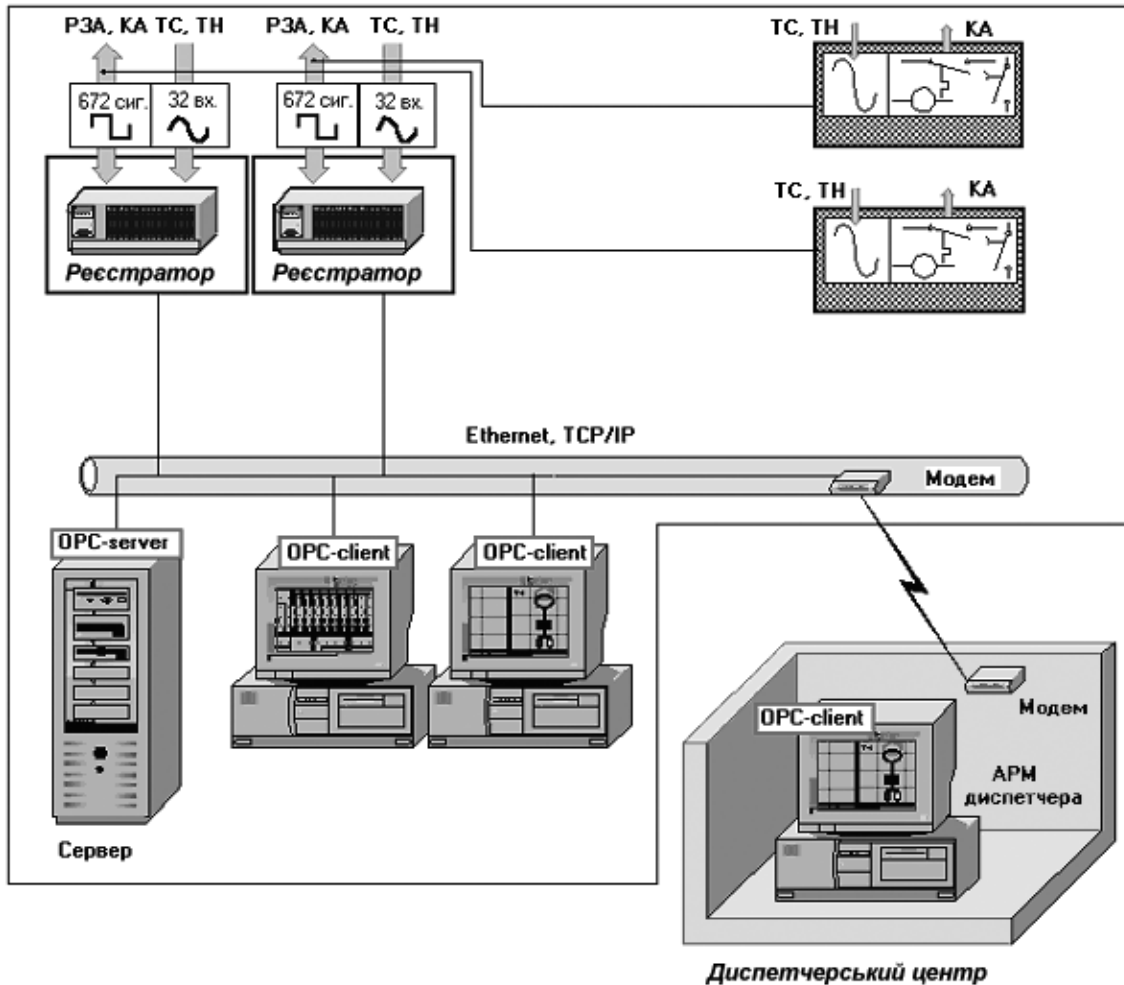


Рисунок 4.1 – Структурна схема підключення інформаційно-діагностичного комплексу “Регіна”

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

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

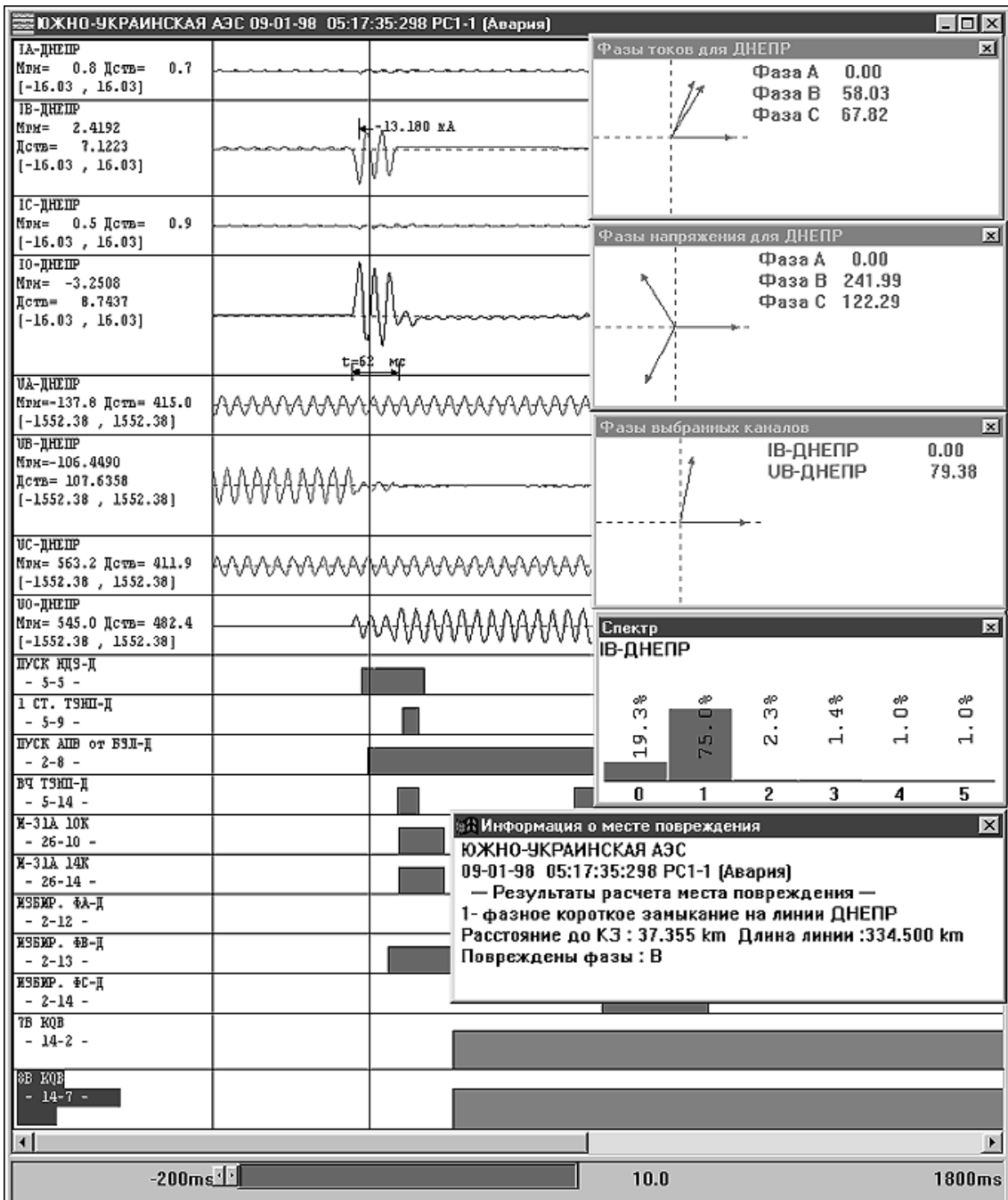


Рисунок 4.2 – Відображення інформації на АРМ диспетчера

## 4.2 Фізичні моделі для дослідження внутрішніх перенапруг

Дослідження внутрішніх перенапруг в проєктованих електропередачах здійснюються на фізичних моделях. Такі дослідження проводилися для основних електропередач 500 кВ і в даний час виконуються для електропередач 750 кВ і вище. Фізичні моделі, що дозволяють проводити всебічні дослідження резонансних і комутаційних перенапруг, є в лабораторіях техніки високих напруг ВЭИ (Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина), МЭИ (Московский энергетический институт), ЛПИ (Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, бывший Ленинградский политехнический институт), НИИПТ (Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения). Нижче наводиться опис фізичної моделі кафедри техніки високих напруг МЭИ.

Модель містить ланцюгові лінії загальною довжиною 3000 км, моделі трансформаторів, вимикачів, розрядників, реакторів, ємностей поперечної і поздовжньої компенсації, набори реактивних опорів. Напряга моделі  $U_i = 110$  В; масштаб часу  $m_t = 1$ . Масштаб опорів може змінюватися в межах  $m_R = 1,8 \div 2,2$ .

Модель лінії виконана у вигляді трифазної ланцюгової схеми, кожна комірka якої моделює ділянку лінії завдовжки 50 км. Схема комірki лінії наведена на рис. 4.3.

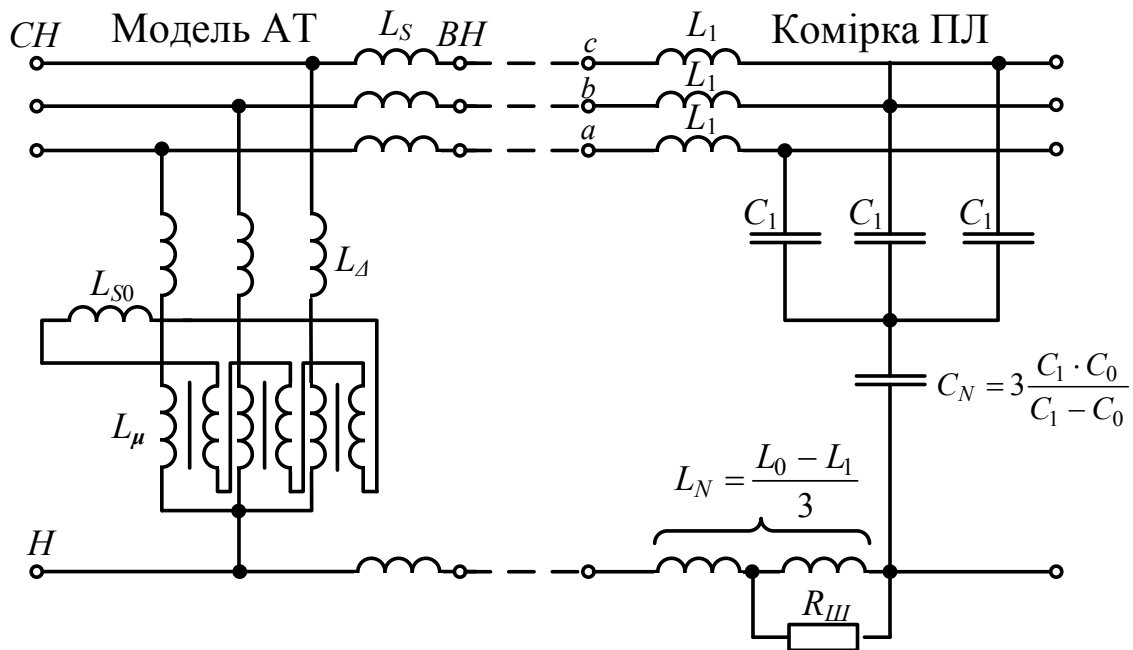


Рисунок 4.3 – Схема комірki лінії і автотрансформатора фізичної моделі МЭИ

У фази включені індуктивності  $L_1$ , в нульовий провід – індуктивність  $L_N = \frac{L_0 - L_1}{3}$ , де індекси 1 і 0 означають пряму і нульову послідовності. Ємність  $C_1$ , з'єднана в зірку, в нейтралі якої включена ємність  $C_N = \frac{3C_1C_0}{C_1 - C_0}$ . У наведеній схемі реактивні опори каналів прямої і нульової послідовностей рівні  $x_1 = \omega L_1$  і  $x_0 = \omega \left( L_1 + 3 \frac{L_0 - L_1}{3} \right) = \omega L_0$ , а реактивна провідність –  $b_1 = \omega C_1$  і  $b_0 = \omega \left( C_1 \parallel \frac{1}{3} \cdot \frac{3C_1C_0}{C_1 - C_0} \right) = \omega C_0$ , як це і повинно бути в трифазному симетричному ланцюзі.

Частина індуктивності в нульовому проводі  $L_N$  шунтована активним опором. Схема з  $L_N$  і  $R_N$  імітує частотну характеристику опору  $z_0$  (див. табл. 3.3). Як індуктивності застосовуються котушки на альсиферових сердечниках, що зберігають лінійну характеристику аж до п'ятикратного натурального струму лінії.

Трансформатори і автотрансформатори моделюються за Г-подібною схемою заміщення (див. рис. 4.3). Модель складається з шунтів намагнічування (котушки  $L_\mu$  і  $L_\Delta$ ), які з'єднуються за схемою «зірка» із заземленою нульовою точкою, опорів розсіювання прямої (котушка  $L_S$ ) і нульової  $L_{S0}$  послідовностей вторинних обмоток котушок, що включаються на розімкнений трикутник. Як нелінійний елемент використовуються котушки на тороїдальних сердечниках з пермалюю.

Модель вимикача відключає кожну фазу при проходженні струму у фазі через нуль, моделює криву відновлювальної ізоляції дугогасильного проміжку вимикача  $u_{np}$  і здійснює повторні запалення в момент рівності напруги на вимикачі  $u_e$  та  $u_{np}$ . Повна схема вимикача дозволяє також моделювати включення фаз ланцюга при заданій електричній фазі напруги.

Фізична модель має в своєму розпорядженні набір індуктивностей і ємностей для імітації реакторів і конденсаторних батарей поперечної і поздовжньої компенсації. На моделі були проведені розробки захисту від перенапруг найважливіших електропередач 500 і 750 кВ.

### 4.3 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.

#### Питання і завдання для самоперевірки

1. Задана блокова схема з параметрами генератора:  $P_g = 600$  МВА,  $x''_g = 0,2$ ; трансформатора:  $P_{тр} = 900$  МВА;  $x_{тр} = 0,15$ ; лінія 500 кВ ( $U_{роб} = 525$  кВ) з хвильовим опором прямій послідовності  $z_1 = 285$  Ом. Потрібно виразити весь опір у відносних одиницях, прийнявши натуральну потужність лінії за базисну.

2. Складіть в загальному вигляді універсальну комплексну схему заміщення для випадку: а) включення двома фазами; б) однофазного короткого замикання і обриву на тій же фазі в одній точці мережі.

3. Розрахуйте параметри лінії 220 кВ з горизонтальним розташуванням проводів і розмірами (див. табл. 1.3.)  $d_{12} = d_{23} = 4$  м;  $h_{ср} = 12$  м,  $r_{лп} = 12$  мм (АС-300). Питома провідність землі  $\gamma = 0,2 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ .

4. Визначте, використовуючи розрахункові криві, підвищення напруги на здорових фазах при однофазному короткому замиканні в мережі з  $x_0 / x_1 = 2,5$  і  $r_0 / x_1 = 0,1$ .

5. Якими коефіцієнтами виражаються складові перенапруги під час комутації в мережі з довгою лінією при однофазному короткому замиканні?

## 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.

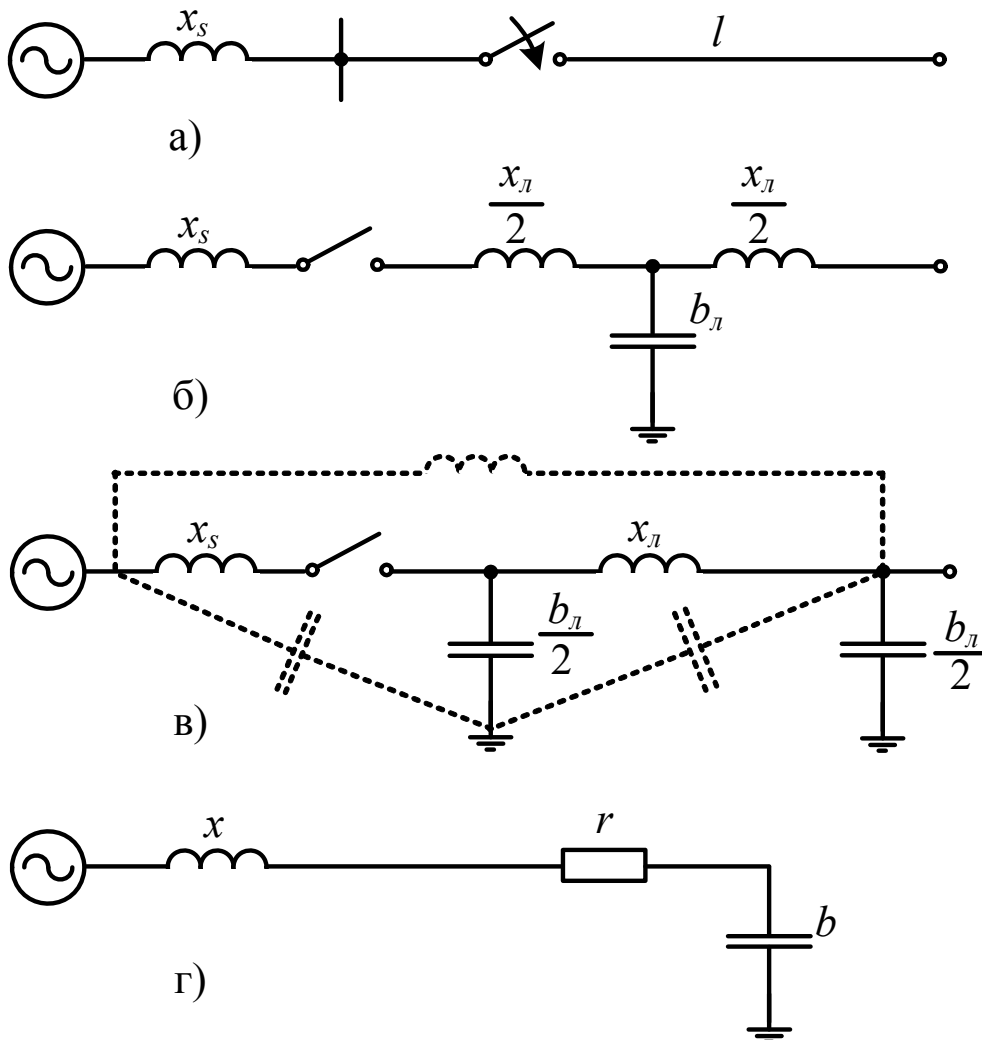


Рисунок 5.1 – Схеми для розрахунку перенапруг при включенні лінії, а – початкова схема; б – Т-подібна схема заміщення; в – П-подібна схема заміщення; г – розрахунковий коливальний контур

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  $\sqrt{x/b}$ .

При включенні коливального контуру  $rxb$  напруга на ємності виражається формулою (3.1). Амплітуда напруги на ємності  $b$ , тобто комутаційна перенапруга при включенні лінії на джерело напруги  $E \cos(\tau + \psi)$ , залежить від власної частоти контуру  $\omega_0 = 1 / \sqrt{xb}$  (вираженої в частках від частоти джерела) і фази комутації  $\psi$ .

Фаза  $\psi$  є випадковою величиною, залежною від моменту зближення контактів вимикача і електричного пробую проміжку між контактами. Вимірювання, проведені на вимикачах, показали значний розкид величин  $\psi$ . Проте найбільш ймовірна комутація в результаті пробую проміжку в момент, близький до максимальної напруги між контактами, тобто в момент, близький до  $\psi = 0$ . Оскільки значенню  $\psi = 0$  відповідає при  $\omega_0 \gg 1$  максимальна напруга на ємності (див. п. 3.1.2), то в розрахунках граничних перенапруг приймається саме цей фазовий кут. При  $\psi = 0$  і  $\omega_0 \gg 1$  напруга на ємності відповідно до формули (3.2) має вигляд:

$$u_{nep} = U_{ycm} \left( \cos \tau - e^{-\delta \tau} \cos \omega_0 \tau \right). \quad (5.1)$$

У цій формулі амплітуда примусової складової  $U_{уст} = \frac{E}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}}$ ,

власна частота коливань контура  $\omega_0 = 1/\sqrt{xb}$ ; коефіцієнт загасання  $\delta = r/2x$  (з урахуванням джоулевих втрат на високих частотах і втрат на корону  $\delta$  порядку 0,1).

На рис. 5.2 наведені характерні криві  $U_{пер}(\tau)$  при різних значеннях  $\omega_0$  і  $\delta = 0$ .

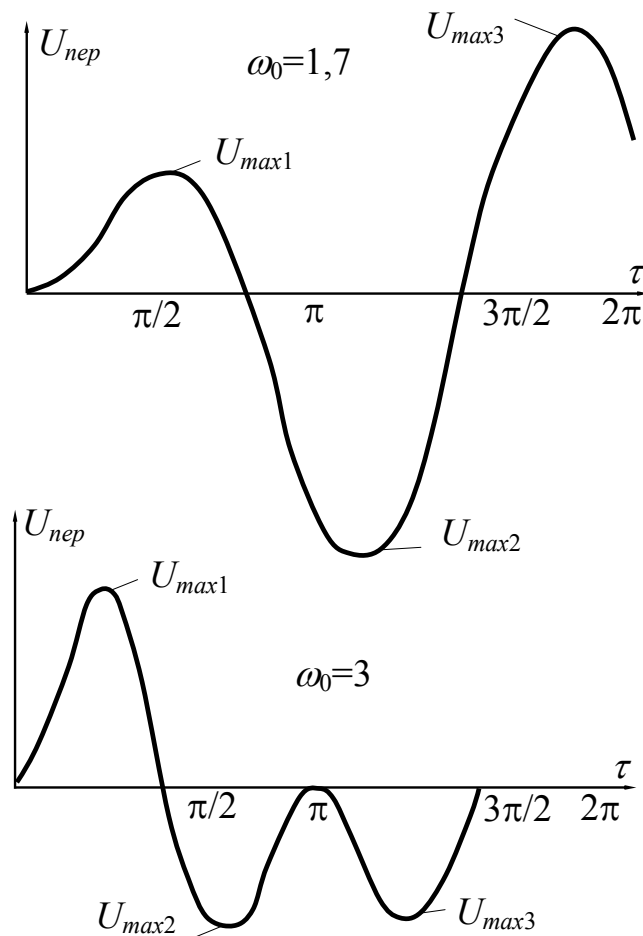


Рисунок 5.2 – Криві перехідного процесу під час включення лінії

Як видно з кривих, при  $\omega_0 = 3$  максимум напруги настає на першій півхвилі, а при  $\omega_0 = 1,7$  – на третій півхвилі. Ця закономірність має загальний характер: чим нижча власна частота  $\omega_0$ , тим далі зсувається максимум напруги. Проте за наявності втрат, тобто  $\delta > 0$ , власні коливання згасають, і максимум не виникає далі третьої півхвилі.



На рис. 5.3 наведено криві ударних коефіцієнтів  $k_{y\partial 1}$ ,  $k_{y\partial 2}$ ,  $k_{y\partial 3}$  відповідно для максимумів на 1-й, 2-й і 3-й півхвилі залежно від частоти  $\omega_0$ . Криві побудовані для ланцюга без втрат ( $\delta = 0$ ), і тому найбільші значення всіх  $k_{y\partial}$  досягають 2. Втрати можна врахувати множенням  $k_{y\partial n}$  на множник  $0,5 \left( 1 + e^{-\delta n \frac{T}{2}} \right)$ , де  $T$  – період власних коливань.

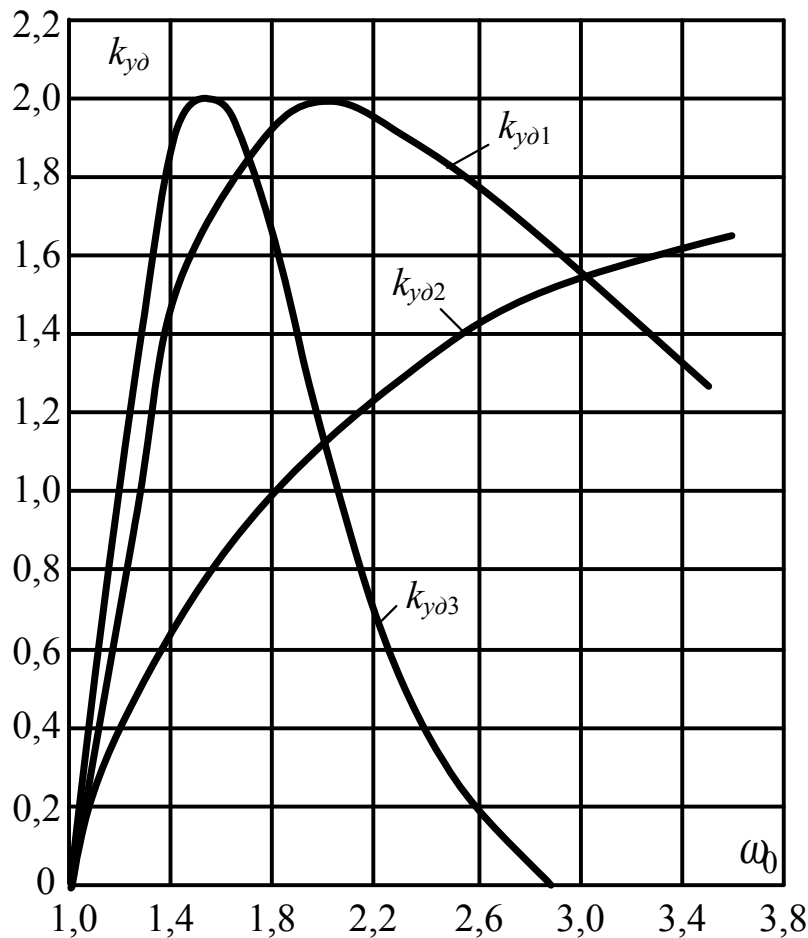


Рисунок 5.3 – Залежність ударних коефіцієнтів, що відповідають першим трьом максимумам напруги, від частоти власних коливань при  $\delta = 0$

При довжині ліній до 100–150 км (лінії 110-220 кВ)  $u_{пер}$ , зазвичай, досягає максимального значення поблизу амплітуди усталеної напруги. Тому для таких ліній дійсна наближена формула:

$$U_{пер} = U_{уст} \left( 1 + e^{-\delta \frac{T}{2}} \right). \quad (5.2)$$

Однофазна схема на рис. 5.1,а та її схема заміщення – коливальний контур – достатньо повно відображають реальну трифазну мережу при одночасному включенні всіх трьох фаз, коли вся напруга і струми у фазах утворюють симетричну систему. Але оскільки кути комутації  $\psi$  вимикачів є випадковими величинами, то завжди виникає деякий розкид в кутах  $\psi$  для різних фаз лінії. З цієї причини перехідні процеси на різних фазах лінії протікають зі зміщенням в часі. Взаємодія цих процесів через взаємну індуктивність і ємність фаз лінії (інакше кажучи, через взаємний хвильовий опір фаз) приводить до додаткового підвищення напруги  $u_{пер}$  на фазах, як це видно з осцилограм на рис. 5.4. Тому в реальній трифазній мережі слід зважати на можливість підвищення  $u_{пер}$ , розрахованого в однофазній схемі на рис. 5.1, на 15–25%.

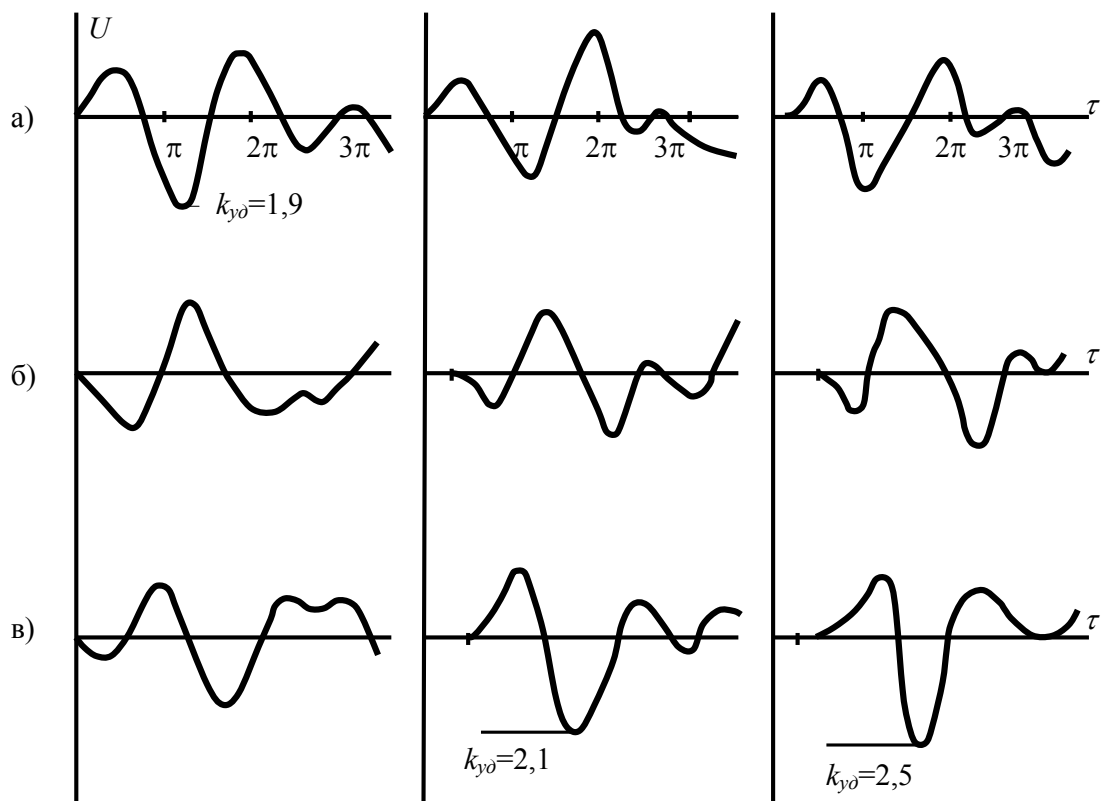


Рисунок 5.4 – Вплив неодноразності замикання контактів фаз вимикача при включенні ненавантаженої лінії на перенапруги на її розімкненому кінці; а – осцилограма при одночасному замиканні контактів; б – осцилограма при неодноразному замиканні контактів (останньою вмикалася фаза С); в – те ж (останньою вмикалася фаза В); потужність к.з. живильної мережі 1250 МВА; лінія довжиною 200 км

**Приклад 5.1.** Визначити кратність перенапруг при включенні лінії на рис. 5.1,а з параметрами (у відносних одиницях)  $E = 1,1$ ;  $x_s = 0,56$ ;  $z = 1$ ;  $\lambda = 0,1\pi$  ( $l = 300$  км). При вказаній довжині лінія може бути заміщена Т-подібною схемою, наведеною на рис. 5.1,б; з параметрами  $x_l/2 = z\lambda/2 = 0,05\pi$  і  $b_l = \lambda = 0,1\pi$ . Тоді коливальний контур має параметри:  $x = 0,715$  і  $b = 0,314$ . Власна частота  $\omega_0 = 1/\sqrt{xb} = 2,2$ ; період коливання  $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2,85$ . На відповідних кривих рис. 5.3 знаходимо  $k_{y\delta 1} \approx 1,9$ ;  $k_{y\delta 2} = 1,2$ ;  $k_{y\delta 3} = 0,7$ . Максимум напруги настає на другій півхвилі з  $k_{y\delta} = 1,9$ . З урахуванням втрат при  $\delta = 0,1$ :

$$k_{y\delta} = 1,9 \cdot \frac{1}{2} \left( 1 + e^{-0,1 \cdot 2 \frac{2,85}{2}} \right) = 1,65.$$

Ємнісний коефіцієнт:

$$k_c = \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega_0^2}} = 1,26.$$

Рівень комутаційної перенапруги  $u_{пер} = 1,1 \cdot 1,26 \cdot 1,65 = 2,3$ .

## 5.2 Перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії з повторними пробоями

Припустимо, що в схемі на рис. 5.5,а вимикач відключає ненавантажено 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. 5.5,б). Відновлювальна напруга на контактах вимикача змінюється за законом:

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

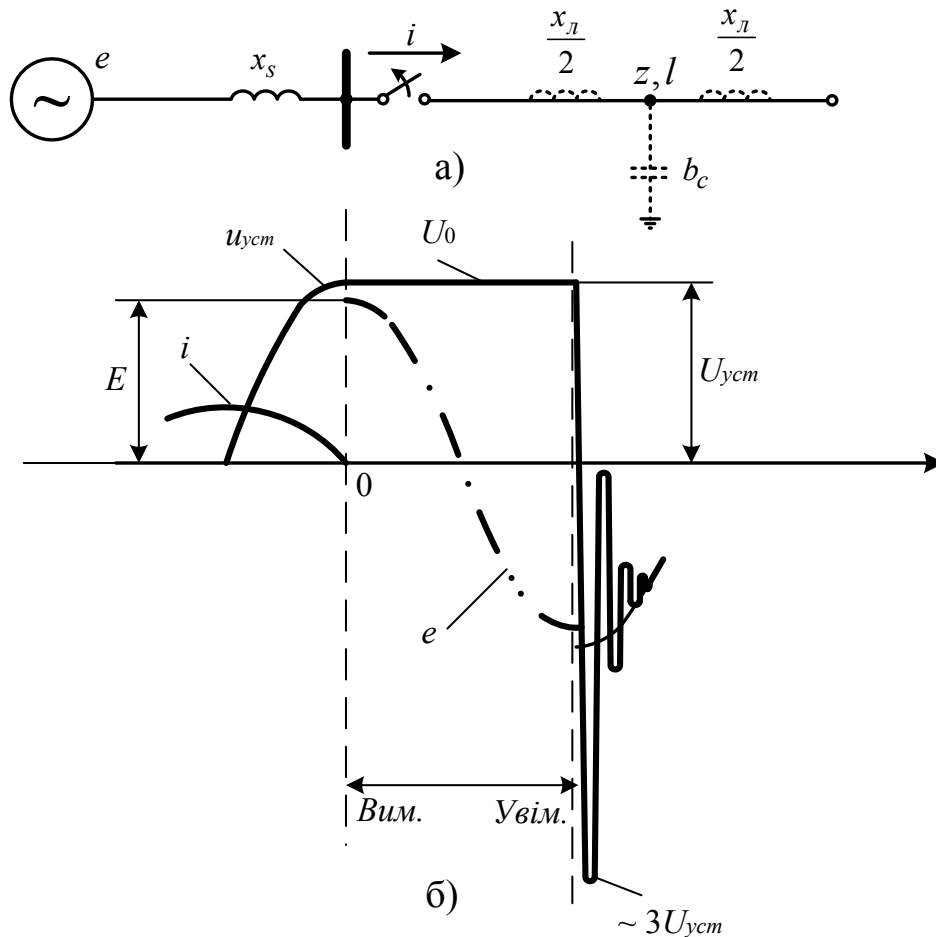


Рисунок 5.5 – Вимкнення ненавантаженої лінії з повторними пробоями  
а – схема мережі; б – криві напруги на вимикачі  
зі сторони живлення та лінії

Якщо тепер при деякій фазі  $\psi$ , яка відлічується від моменту згасання ємнісного струму, виникне повторний пробій дугогасильного проміжку у вимикачі, то виникає перехідний процес ввімкнення лінії з початковою напругою  $U_0$ . Напруга на ємності лінії змінюється за формулою:

$$u_{пер} = U_{уст} \left( \cos(\tau + \psi) - \left[ \cos \psi \cos \omega_0 \tau - \frac{1}{\omega_0} \sin \psi \sin \omega_0 \tau \right] e^{-\delta \tau} \right) - U_0 \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}. \quad (5.3)$$

Максимальна напруга в перехідному процесі залежить від фази  $\psi$ , тобто моменту повторного пробую. Можливість виникнення повторного пробую визначається співвідношенням між ходом кривих зростання електричної ізоляції проміжків вимикача і відновлювальної напруги. Ці криві показано на рис. 5.6. Крива  $u_{np}(t)$  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  $u_e(t)$ . За час  $\Delta t$  контакти встигають розійтися на відстань  $v\Delta t$  ( $v$  – швидкість руху контактів), і на початок зростання  $u_e(t)$  електрична ізоляція проміжків швидко наростає, як це показано пунктирною лінією на рис. 5.6.

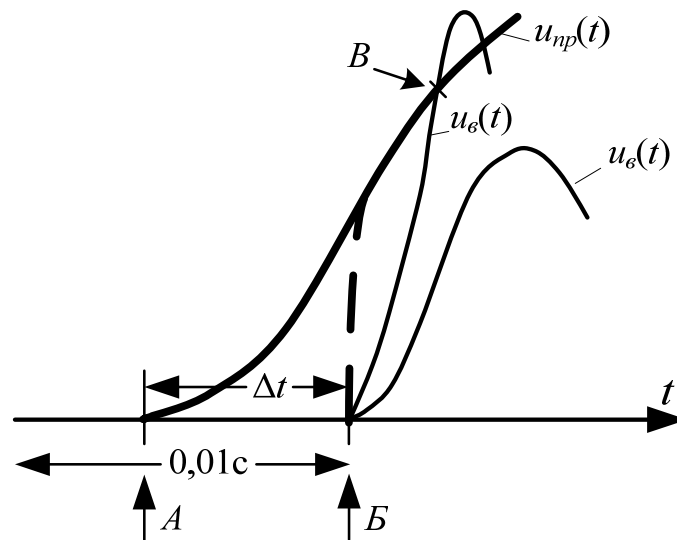


Рисунок 5.6 – Криві відновлювальної напруги  $u_{\hat{a}}$  та відновлювальної ізоляції  $u_{i\delta}$  для вимикача лінії під час інтервалу  $\Delta t$  між початком розходження контактів та гасінням дуги.

$A$  – момент розходження контактів;  $B$  – момент гасіння дуги;  
 $B$  – повторне запалення

Оскільки момент розходження контактів абсолютно випадковий, тобто величина  $\Delta t$  має однакову імовірність в межах від нуля до  $0,01\text{с}$ ; то умови для виникнення повторного пробую підпорядковуються статистичній закономірності. В найгіршому випадку  $\Delta t = 0$ . Повторний пробій виникає за умови, коли крива  $u_e(t)$  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 (5.3)  $\psi = 0$ , знаходимо, що амплітуда  $U_{пер}$  з урахуванням ємнісного ефекту сягає  $(3 \div 3,5) U_{\phi}$ .

У повітряних і сучасних масляних вимикачах швидкість наростання кривої  $u_{np}(t)$  висока і найбільш ймовірний повторний пробій в початковий момент наростання  $u_e(t)$ . Такі повторні пробіи не приводять до високих комутаційних перенапруг. У цьому можна переконатися, провівши розрахунок за формулою (5.3) при малих  $\psi$ . Тому було запропоновано повторні пробіи, що відбуваються при  $\psi < \pi/2$ , називати повторними запаленнями і вважати ці комутації безпечними. Це, проте, справедливо тільки при великих  $\omega_0$ , коли можна нехтувати складовою  $\frac{1}{\omega_0} \sin \psi \sin \omega_0 \tau$  у формулі (5.3). При

$\omega_0 < 2$  (лінії великої довжини) комутація при  $\psi < \pi/2$  приводить до  $U_{пер}$ , що сягає  $(1,8 \div 1,9) U_{уст}$  або  $(2,3 \div 2,5) U_{\delta}$ , тобто є небезпечною перенапругою для ліній 500-1150 кВ. Тому для цих ліній, які характеризуються низькою  $\omega_0$ , граничний кут  $\psi$ , при якому повторні пробіи можуть вважатися безпечними повторними запаленнями, повинен бути істотно знижений.

Сучасні вимикачі високої напруги повинні мати дугогасильні системи, які допускають тільки повторні запалення, але не повторні пробіи. У системах з такими вимикачами перенапруги при відключенні ненавантаженої лінії є безпечними. Проте в деяких окремих випадках за несприятливої схеми мережі (великі реактивні опори мережі  $x_s$ ), при падінні тиску повітря в повітряному вимикачі і т.п. все ж таки можливі повторні пробіи, що приводять до перенапруг порядку  $3,0 U_{\phi}$  або навіть вищих. Відключення ненавантажених ліній вимикачами застарілих конструкцій, особливо в мережах з ізольованою і компенсованою нейтраллю (35 кВ і нижче), часто супроводжуються повторними пробоями і комутаційними перенапругами високої кратності.

Сучасними правилами експлуатації допускається відключення ненавантажених ліній малої довжини і шин підстанцій роз'єднувачами. Під час відносно повільного розходження ножів роз'єднувача дуга ємнісного струму в місці розриву може багато разів гаснути і знов запалюватися. Досліди показали, що при цьому виникають перенапруги до  $(3,0 \div 3,5) U_{\phi}$ . Багатократне спрацьовування розрядника під впливом цих перенапруг може його зруйнувати.

### 5.3 Перенапруги під час повторного включення лінії

Розглянемо схему на рис. 5.7,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.

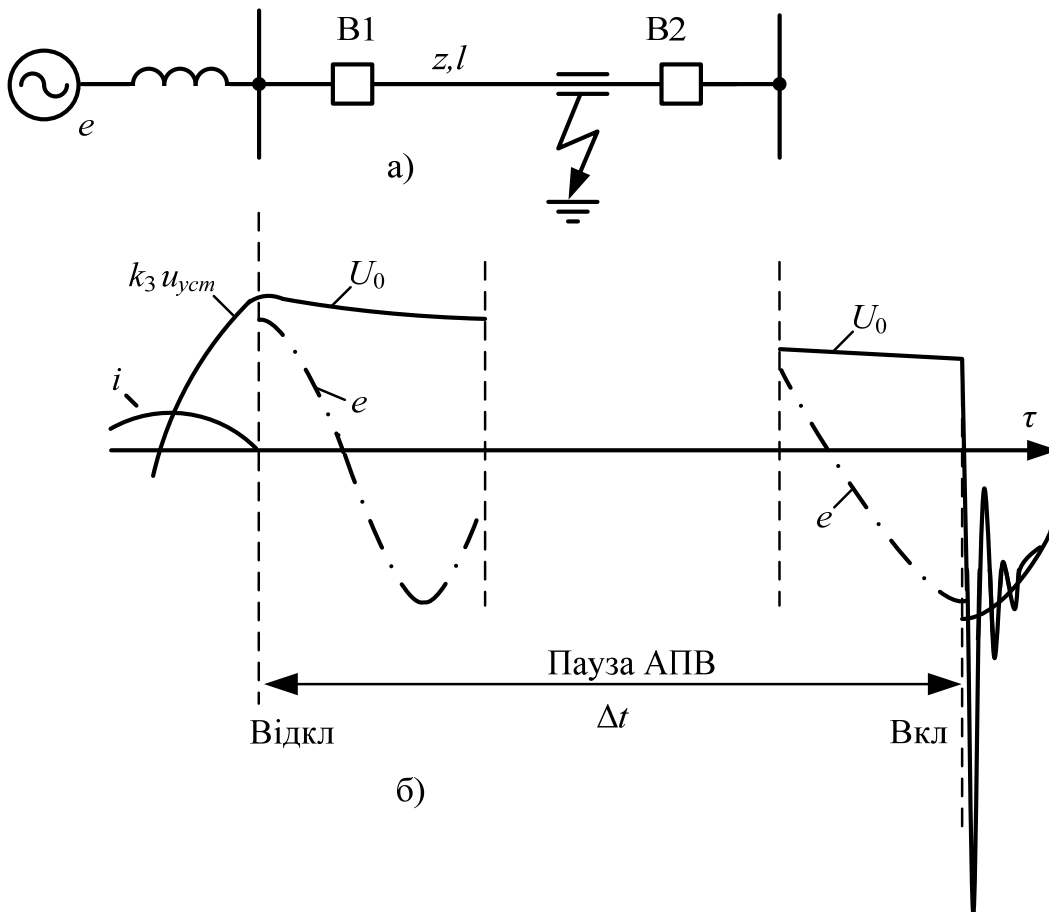


Рисунок 5.7 – Відключення і включення лінії в циклі АПВ,  
а – схема мережі; б – крива напруги на вимикачі з боку живлення і лінії

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

$$U_0 = U_{уст} \cdot k_3,$$

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

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

При відключенні лінії у фазах вимикача, що живлять здорові фази лінії, тече ємнісний струм, і при обриві цього струму у момент проходження через нульове значення напруга на проводах має амплітудне значення, тобто рівне  $U_{yсм}k_3$ . Як і при відключенні ненавантаженої лінії, ця напруга після відключення В1 підтримується на проводах залишковими зарядами. Але, на відміну від схеми на рис. 5.5, при повторному включенні лінії заряди на проводах протягом паузи АПВ частково стікають в землю по шляхах витоку ізоляторів. У дощ провідність цих шляхів висока, в суху погоду мала. Стікання заряду, і зниження напруги на здорових фазах враховуються коефіцієнтом  $k_q$ , залежним від тривалості безструмової паузи. У суху погоду середні значення  $k_q$  рівні 0,7 для  $\Delta t = 0,2$  с, 0,6 – для  $\Delta t = 0,4$  с і 0,5 – для  $\Delta t = 1$  с. Отже, за час безструмової паузи напруга на лінії спадає до  $k_q k_3 U_{yсм}$ . Ця напруга і буде початковою напругою  $U_0$  на ємностях здорових фаз при повторному включенні лінії.

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

Припускаючи, що комутація повторного включення відбудеться при протилежній полярності джерела і в найсприятливішу фазу комутації (рис. 5.7,б), одержуємо формулу для  $u_{пер}$ :

при успішному АПВ

$$u_{пер} = U_{yсм} \left[ \left( \cos \tau - \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} \right) - k_q k_3 \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} \right]; \quad (5.4,а)$$

при неуспішному АПВ

$$u_{пер} = k_3 U_{yсм} \left[ \cos \tau - (1 + k_q) \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} \right], \quad (5.4,б)$$

де  $k_3$  визначається по кривих на рис. 5.5.

Для коротких ліній максимальні напруги визначаються формулами (аналогічними формулі (5.2)):

при успішному АПВ



$$U_{nep} = U_{yсм} \left[ 1 + (1 + k_q k_3) e^{-\delta \frac{T}{2}} \right] \quad (5.5,а)$$

при неуспішному АПВ

$$U_{nep} = k_3 U_{yсм} \left[ 1 + (1 + k_q) e^{-\delta \frac{T}{2}} \right] \quad (5.5,б)$$

**Приклад 5.2** Визначити значення  $U_{nep}$  в колі на рис. 5.7,а з параметрами (див. приклад 5.1):  $E = 1,1$ ;  $\omega_0 = 2,2$ ;  $T = 2 \frac{\pi}{\omega_0} = 2,85$ ;  $\delta = 0,1$ ;  $k_3 = 1,2$  при успішному АПВ в суху погоду при  $\Delta t = 0,4$  с.

Вказаному значенню  $\Delta t$  відповідає  $k_q = 0,6$ . За формулою (5.5,а) знаходимо:

$$U_{nep} = 1,1 \cdot 1,26 \left[ 1 + (1 + 0,6 \cdot 1,2) \cdot e^{-0,1 \frac{2,85}{2}} \right] \approx 3,6.$$

Розрахунки за формулами (5.4) і (5.5) показують, що максимальні  $U_{nep}$  сягають  $(3 \div 3,5)U_{\phi}$ . При врахуванні неодноразовості включення і взаємного впливу фаз лінії ці значення можуть бути ще вищими. Повторні включення ліній внаслідок великої ймовірності такої комутації приводять до найбільш небезпечних перенапруг в мережах.

#### 5.4 Відновлювальні напруги при відключенні коротких замикань

Відключення короткого замикання розглянемо на простій схемі рис. 5.8,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. 5.8,б, в якій джерело

струму  $i_{кз} = I_{кз} \sin \tau$  вмикається на коливальний контур  $x_s b_s$ . Напряга  $u_\theta(\tau)$  виражається формулою

$$u_\theta = I_{кз} x_s (1 - \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}). \quad (5.6)$$

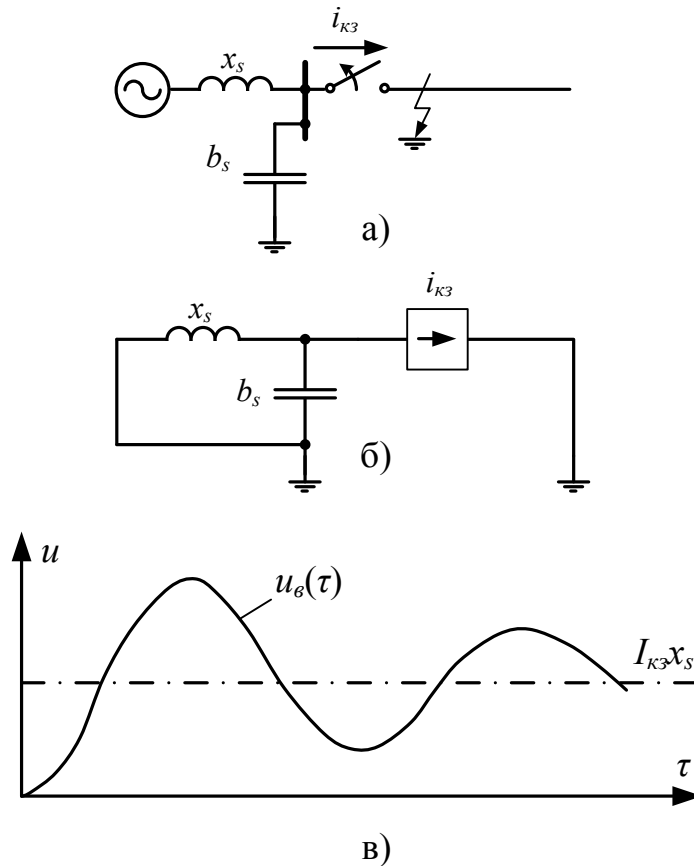


Рисунок 5.8 – Відключення короткого замикання за вимикачем  
а – початкова схема; б – розрахункова схема; в – крива  $u_\theta(\tau)$

Крива  $u_\theta(\tau)$  показана на рис. 5.8,в. На початковій ділянці кривої  $u_\theta(\tau)$  визначають  $\frac{\Delta u_\theta(\tau)}{\Delta \tau}$  – 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 затягує відключення короткого замикання або навіть приводить до руйнування дугогасильних камер вимикача. За сучасними нормами вимикачі повинні маркуватися не тільки за потужністю  $P = \sqrt{3} U_H I_{кз}$ , яка відключається, але і за допустимою швидкістю відновлення напруги. Для напруг 110-220 кВ нормується ш.в.н. у 1 кВ/мкс на початковій частині кривої  $u_\theta(\tau)$ .

Найбільшою небезпекою для вимикача є короткі замикання на лінії на відстані декількох кілометрів від вимикача – так звані невіддалені короткі замикання (рис. 5.9,а). Заміщаючи лінію коливальним контуром  $x_L b_L$ , приходимо до розрахункової схеми, показаної на рис. 5.9,б. Напруга  $u_B(\tau)$  виражається

$$u_B = I_{кз} x_s \left[ (1 - \cos \omega_{0,1} \tau) e^{-\delta_1 \tau} + \frac{x_L}{x_s} (1 - \cos \omega_{0,2} \tau) e^{-\delta_2 \tau} \right]. \quad (5.6,а)$$

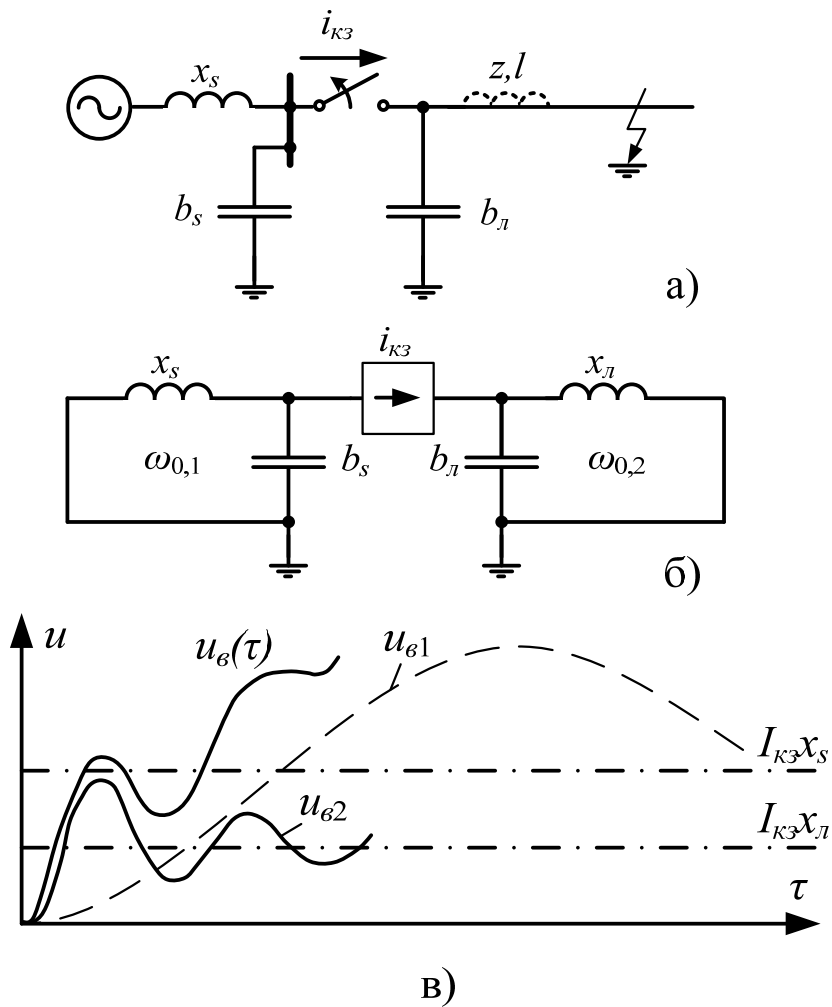


Рисунок 5.9 – Відключення невіддаленого короткого замикання,  
 а – початкова схема; б – розрахункова схема;  
 в – крива  $u_B(\tau)$  та її складові

Частоти коливань рівні відповідно  $\omega_{0,1} = \frac{1}{\sqrt{x_s b_s}}$  і  $\omega_{0,2} = \frac{1}{\sqrt{x_L b_L}}$ .

Внаслідок малої величини  $x_L$  і  $b_L$  частота  $\omega_{0,2} \gg \omega_{0,1}$ . Найбільш

небезпечні короткі замикання за малим  $x_s$  і реактивним опором  $x_L$ , що відповідає 1–3 км лінії.

В цьому випадку струм короткого замикання  $I_{кз} = \frac{E}{x_s + x_L}$

практично не відрізняється від струму к.з. на шинах живильної підстанції, напруга  $I_{кз} \cdot x_L$  вже достатньо висока, а частота відновлювальної напруги, з боку лінії  $\omega_{0,2}$ , ще велика. Крива  $u_e(\tau)$  та її складові для невіддаленого короткого замикання, побудовані за формулою (5.6,а), показані на рис. 5.9,в.

Формули (5.6) і криві  $u_e(\tau)$  на рис. 5.8 і 5.9 дійсні при заміщенні ліній П-подібними схемами. У реальних, розгалужених мережах крива напруги  $u_{e1}(\tau)$  з боку шин аперіодична з амплітудою порядку  $1,3U_\phi$ . У початковій своїй частині, приблизно до 70% амплітуди,  $u_{e1}$  наростає прямолінійно зі швидкістю (ш.в.н.)  $I_{кз}\omega z_e$ , де  $z_e$  – еквівалентний хвильовий опір ліній, підключених до шин (без врахування лінії, на якій відбулося коротке замикання). При невіддалених коротких замиканнях і врахуванні хвильових параметрів ділянки лінії до місця к.з. відновлювальна напруга з боку лінії має пилкоподібну форму і ш.в.н. з боку лінії рівна  $I_{кз}\omega z_L$ , де  $z_L$  – хвильовий опір лінії. Отже, сумарна ш.в.н. рівна  $I_{кз}\omega(z_e + z_L)$ . Враховуючи, що  $z_L \gg z_e$  завжди, то ш.в.н. при невіддаленому короткому замиканні значно перевищує нормовані значення. Тому в багатьох країнах проводять спеціальні випробування вимикачів в схемі невіддаленого короткого замикання.

## 5.5 Комутаційні перенапруги і відновлювальні напруги при розриві електричної передачі в асинхронному режимі

Нехай в схемі на рис. 5.10, в якій генератори  $e_1$  з'єднані через електропередачу з потужною приймальною системою  $e_2$ , виник асинхронний режим. У цьому режимі ротор  $e_1$  і, відповідно, вектор  $\dot{E}_1$  обертаються з деякою малою частотою ковзання щодо вектора системи  $\dot{E}_2$ . Припустимо, що вимикач  $B$  відключає лінію в момент  $\tau = 0$ , близький до максимальної розбіжності векторів  $\dot{E}_1$  і  $\dot{E}_2$ . Відповідно миттєві значення напруг  $e_1 = E_1 \cos(\tau + \psi_1)$  і  $e_2 = -E_2 \cos(\tau + \psi_2)$ . При розриві лінії в коливальному контурі  $xb$  виникає перехідний процес, обумовлений зміною напруги на ємності

$b$ ; до комутації  $e_2 = u_c$ , після комутації  $u_c$  прямує до величини, яка визначається тільки е.р.с.  $e_1$ .

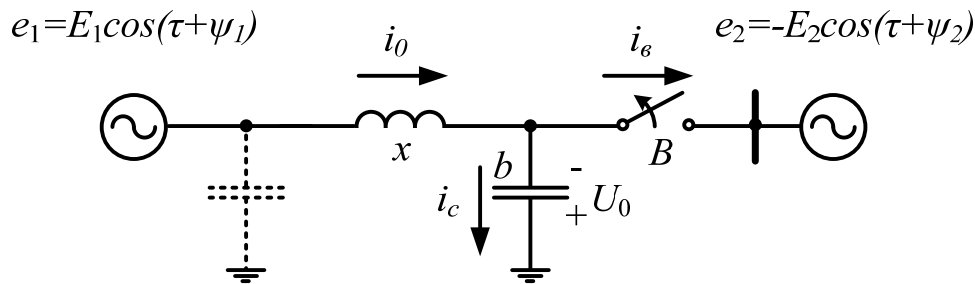


Рисунок 5.10 – Розрив електропередачі в асинхронному режимі

Коливальний процес в контурі відбувається за ненульових початкових умов. У момент  $\tau = 0$  початкова напруга на ємності  $U_0 = -E_2 \cos \psi_2$ . Початковий струм в індуктивності  $x$  визначається з таких міркувань. Вимикач  $B$  розриває ланцюг при проходженні струму  $i_B = i_0 - i_c$  через нуль. Отже, у цей момент  $i_0 = i_c = E_2 b \sin \psi_2$ . Помітимо при цьому, що кути  $\psi_1$  і  $\psi_2$  зв'язані між собою співвідношенням

$$\frac{E_1 + E_2 \sin(\psi_1 - \psi_2)}{x} + E_2 b \sin \psi_2 = 0,$$

і, отже, існує однозначний зв'язок між  $i_0$  і розбіжністю векторів  $\dot{E}_1$  і  $\dot{E}_2$ .

За вказаних початкових умов напруга на ємності  $b$  виражається функцією

$$u_{пер} = U_{уст} \left[ (\cos \tau + \psi) - \left[ \cos \psi \cos \omega_0 \tau - \frac{1}{\omega_0} \sin \psi \sin \omega_0 \tau \right] e^{-\delta \tau} \right] + U_0 \cos \omega_0 \tau e^{-\delta \tau} + i_0 \sqrt{\frac{x}{b}} \sin \omega_0 \tau e^{-\delta \tau}, \quad (5.7)$$

причому позначення  $U_{уст}$ ,  $\omega_0$ ,  $\delta$  були введені раніше,  $\psi = \psi_1 - \psi_2$ .

Виникненню асинхронного режиму звичайно передують форсування збудження генераторів (з метою уникнення асинхронного режиму). Тому значення  $E_1$  може бути підвищеним до 1,2-1,3. Велика також початкова напруга:  $U_0 = -E_2 \cos \psi_2$ . Наявність початкового

струму  $i_0 = E_2 b \sin \psi_2$  приводить в процесі коливання до додаткового підйому напруги  $u_{nep}$ . Внаслідок вказаних причин амплітуда  $U_{nep}$  при розриві електропередачі в асинхронному режимі доходить до  $(3,5-4)U_\phi$ , і ця комутація вважається найбільш небезпечною. Дуже висока і амплітуда відновлюваної напруги на вимикачі  $U_\epsilon$ , рівна  $U_\epsilon = U_{nep} + E_2$ . Електрична ізоляція між контактами вимикача повинна зрости до значень, що перевищують  $U_\epsilon$  за час півперіоду  $T_0/2$  власних коливань контуру  $x_b$ . Роботу вимикача полегшує невелика швидкість відновлення напруги внаслідок відносно малої частоти  $\omega_0$ .

Сучасна системна автоматика здійснює ресинхронізацію систем, що вийшли з синхронізму, без відключення електропередачі. Тому розрив електропередачі в асинхронному режимі в найсприятливіший момент максимальної розбіжності векторів слід вважати малоюмовірним явищем в системах. У електропередачах, схильних до випадання з синхронізму, наприклад, для слабких міжсистемних зв'язків, раціонально застосовувати пристрій блокування, що дозволяє уникнути відключення вимикача в момент, близький до максимальної розбіжності векторів  $\dot{E}_1$  і  $\dot{E}_2$ .

## 5.6 Особливості розвитку комутаційних перенапруг з урахуванням хвильових процесів на лініях

У схемі на рис. 5.1,а; який був основою під час вивчення перехідних процесів, лінія заміщала Т- або П-подібною схемою із зосередженими параметрами. Розглянемо особливості розвитку перенапруг з урахуванням хвильових процесів на лініях. При цьому система, заміщена раніше реактивним опором  $x_s$ , повинна бути подана з урахуванням реальної схеми приєднання на шинах підстанції. Звичайно до шин приєднано декілька ліній; нехай їх число рівне  $n$ . Тоді при дослідженні хвильового процесу на одній з ліній решта  $n-1$  ліній повинні заміщатися своїми хвильовими опорами  $\frac{z}{n-1}$ . В результаті схема заміщення приймає вигляд, показаний на

рис. 5.11,а. У цій схемі реактивний опір  $x_s$  заміщає ту частину системи, яка живить шини підстанції через трансформатори. Схема правильна до моменту приходу відбитих хвиль по одній з  $n-1$  ліній.

Особливістю схеми є майже прямокутний фронт хвилі, яка рухається по лінії при включенні вимикача  $B$ . На кінці ненавантаженої лінії відбувається повне відбиття. Якщо лінія була заряджена до напруги  $U_0 = -U_\phi$ , а число ліній  $n$  достатньо велике, то напруга в

кінці лінії зростає приблизно до  $3U_\phi$ . Фронт хвилі дещо розтягується (до десятків мікросекунд) під дією втрат в лінії.

На рис. 5.11,а розглянуто лише початкову ділянку хвилі; подальший її хід визначається багатократними відбиттями по всіх лініях системи. Розрахунок амплітуди хвилі достатньо точний за схемою заміщення із зосередженими параметрами. Звідки випливає, що схема (рис. 5.11) уточнює, в основному, форму фронту хвилі. Таке уточнення є важливим при оцінюванні розрядних напруг повітряної ізоляції. Як було зазначено раніше, розрядна напруга при комутаційних імпульсах з крутим фронтом знижується на 15–20% відносно змінної напруги.

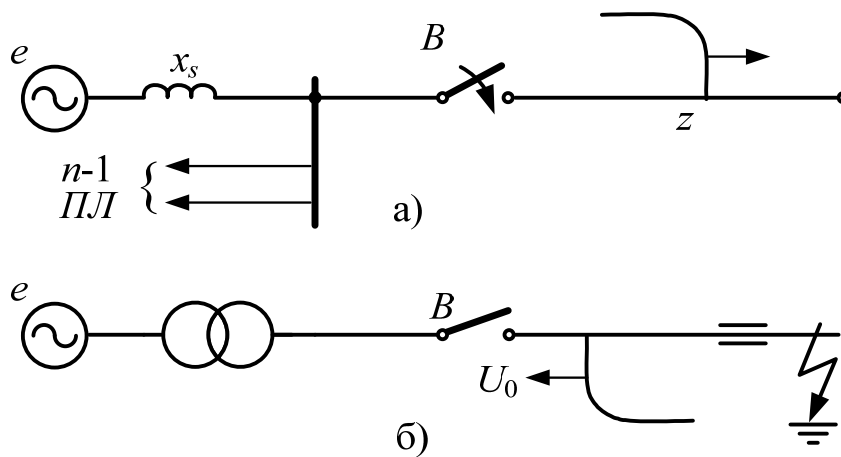


Рисунок 5.11 – Утворення комутаційної хвилі з крутим фронтом, а – при ввімкненні лінії; б – при однофазному короткому замиканні

Інший важливий випадок комутаційного хвильового процесу показано на рис. 5.11,б. На лінії під дією комутаційної перенапруги  $U_0$ , що розвинулась, наприклад, внаслідок ввімкнення лінії, відбулось однофазне коротке замикання. Розрядна хвиля  $U_0$  доходить до трансформатора на початку лінії, відбивається, в результаті чого напруга піднімається до величини  $-2U_0 + U_\phi$ . Якщо, наприклад, прийняти  $U_0 = 2,5U_\phi$ , то на трансформаторі виникає хвиля з крутим фронтом амплітудою  $4U_\phi$ . Розвитку таких великих перенапруг перешкоджають вентильні розрядники біля трансформаторів. Однак перенапруги можуть бути небезпечні для поздовжньої ізоляції трансформаторів.

## 5.7 Перенапруги при відключенні ненавантажених трансформаторів та реакторів

Відключення індуктивних навантажень – ненавантаженого трансформатора чи реактора – веде до появи на них і на вимикачі перенапруг, пов'язаних з обривом (чи «зрізом») вимикачем індуктивного струму до його природного переходу через нульове значення. Магнітна енергія, що при цьому вивільняється в індуктивності, переходить в електричну енергію ємності, що підключається паралельно індуктивності; з цією енергією і пов'язане виникнення перенапруги на ємності. Зріз струму зумовлений інтенсивною деіонізацією проміжку в вимикачі, у результаті якої різко падає провідність дуги ще до переходу струму через нульове значення. Пониження провідності призводить до зниження потужності, що надходить в дугу, і її тепловий баланс порушується. Паралельно дуговому проміжку завжди є якась ємність; падіння напруги дуги призводить до переходу струму в ємнісну провідність, внаслідок чого струм в дузі ще більше падає, дуга отримує нестійкий характер і гасне, якщо тільки напруга, яка відновлюється, не виявиться достатньою для повторного запалення.

Механізм утворення перенапруг можна прослідкувати за схемою на рис. 5.12,а. В цій схемі трансформатор в режимі холостого ходу представлений еквівалентною схемою  $L_\mu, C, g$  де  $L_\mu$  – індуктивність намагнічування трансформатора,  $C$  – ємність обмотки, яка відключається,  $g$  – провідність, еквівалентна втратам в міді і сталі.

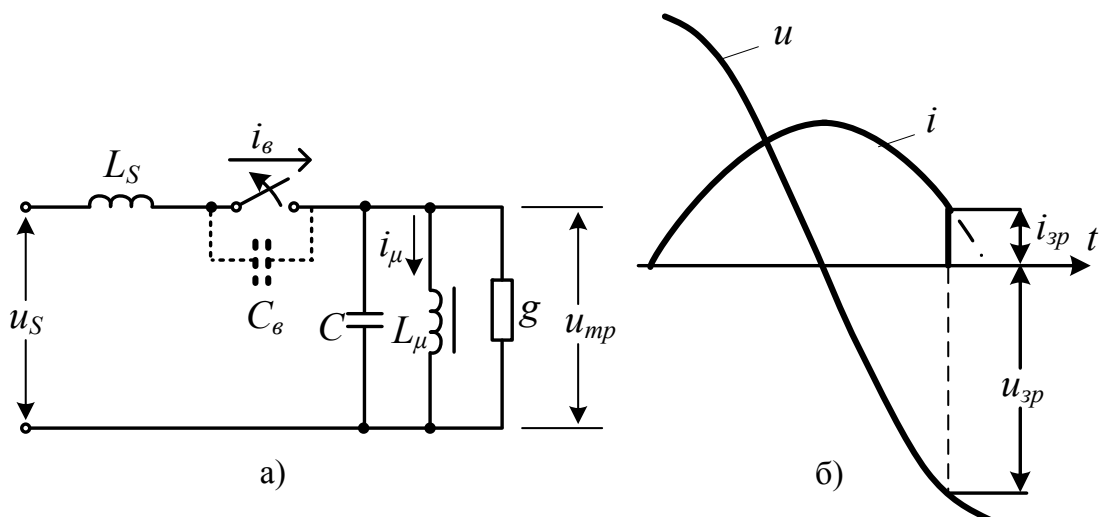


Рисунок 5.12 – Схема для розрахунку перенапруг, що виникають при зрізі малого індуктивного струму на контактах вимикача (а), і параметри зрізу  $i_{zp}$  та  $u_{zp}$  (б)



Власна частота коливань  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_\mu \cdot C}}$  потужних

трансформаторів порядку сотень герц; декремент загасання коливань буде рівним приблизно 0,1; характеристичний опір  $z = \sqrt{\frac{L_\mu}{C}}$  коливатиметься в межах десятків кілоом.

Зріз струму вимикачем звичайно відбувається на спадній частині кривої індуктивного струму  $i(t)$  так, як це показано на рис. 5.12. В момент комутації початковий струм в індуктивності  $i_\mu \approx i_{зр}$ , а початкова напруга на ємності буде рівною  $u_{зр}$ . Після обриву струму виникають коливання, в ході яких напруга на трансформаторі виражається формулою:

$$u_{mp} = \left( i_{зр} \sqrt{\frac{L_\mu}{C}} \sin \omega_0 t + u_{зр} \cos \omega_0 t \right) e^{-\delta t}. \quad (5.8)$$

Максимальна напруга на трансформаторі буде рівною (втратами нехтуємо):

$$U_{nep} \approx \sqrt{i_{зр}^2 \frac{L_\mu}{C} + u_{зр}^2}, \quad (5.9)$$

причому звичайно перший член під коренем значно перевищує другий. Звідси випливає, що перенапруги приблизно пропорційні струму зрізу  $i_{зр}$ , а також характеристичному опору кола  $\sqrt{\frac{L_\mu}{C}}$ . Для кожного типу вимикача можна приблизно вказати максимальний струм зрізу  $i_{зр}$ .

Крива напруги  $u_{mp}(t)$  згідно з формулою (5.8) називається очікуваною напругою; такі напруги можливі, якщо крива відновлюваної ізоляції вимикача  $u_{mp}(t)$  йде вище кривої відновлювальної напруги на вимикачі  $u_s(t) = u_{mp} - u_s$ . При використанні вимикача з подібною характеристикою перенапруги на трансформаторах і вимикачах можуть досягати надзвичайно великих значень. В дійсності стійкість дугового проміжку звичайно обмежує

напруга  $u_{\epsilon}$ , що призводить до утворення серії повторних запалювань та гасінь дуги, в результаті яких розсіюється енергія, що була накопичена в  $L_{\mu}$ , та знижуються перенапруги. На рис. 5.13 показана стилізована осцилограма відключення малого індуктивного струму  $i_{зр1}$ , вимикач створив «зріз» та напруга  $u_{\epsilon1}$  наростає у відповідності з кривою очікуваної напруги. Внаслідок невеликого розходження контактів вимикача ізоляція проміжку ще невелика і відбувається повторне запалювання на фронті відновлювальної напруги. Це призводить до високочастотного розрядження ємності  $C$  на коло джерела. Внаслідок малого значення індуктивності джерела  $L$  це коливання має високу частоту. Коли в процесі коливального розряду накопичена в ємності  $C$  енергія в значній мірі розсіється в опорах  $g$  та дузі і малий струм в дузі буде, в основному, визначатися е.р.с. джерела, дуга між контактами знову гаситься. Напруга на ємності  $C$  та на контактах вимикача знову починає наростати, але вже по кривій з меншою крутизною та меншою очікуваною амплітудою.

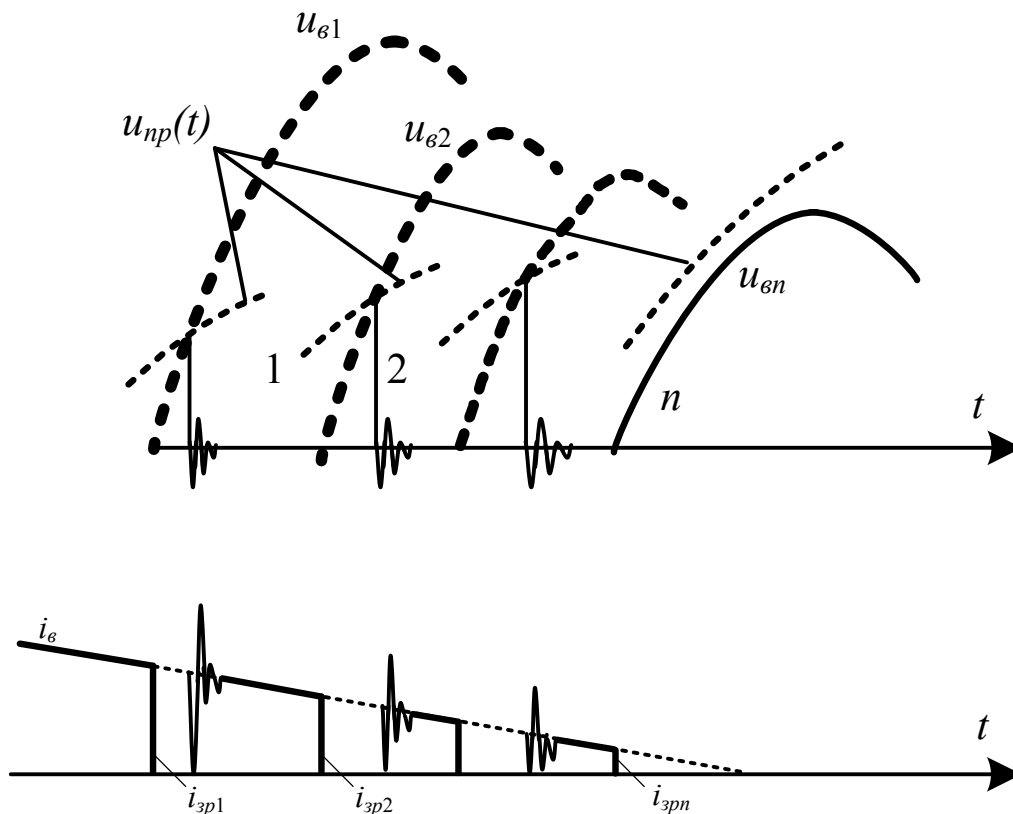


Рисунок 5.13 – Стилїзована осцилограма напруги та струму у вимикачі при відключенні ненавантаженого трансформатора з рядом (1, 2, ..., n) зрізів та повторних запалювань дуги у вимикачі

Процес повторних запалювань та обривів дуги продовжується до тих пір, поки крива напруги, що відновлюється з амплітудою  $U_{\theta}$ , вже не буде перетинати криву ізоляції проміжку  $u_{np}(t)$ . Як видно з рис. 5.13, чим повільніше наростає остання крива, тим більше повторних запалювань та гасінь дуги відбувається, тим більше розсіюється енергія, що була накопичена у індуктивності  $L_{\mu}$  і тим менша амплітуда перенапруг на ємності  $C$  та на контактах вимикача.

Форма кривої напруги на трансформаторі при її відключенні з повторними запалюваннями показана рис. 5.14. Відповідно до зрізів та запалювань дуги у вимикачі крива напруги на трансформаторі набуває пилкоподібну складову відносно низької частоти – порядку сотень або тисяч герц (низькочастотна складова  $u_{mp}$ ). При кожному запалюванні дуги, крім того, відбувається високочастотний процес перезаряджання ємності  $C$  через малу індуктивність мережі  $x_s$ . Частота цих коливань доходить до десятків і сотень кілогерц (високочастотна складова  $u_{mp}$ ), і коливання зазвичай важко помітити на осцилограмах. Найбільші перенапруги на трансформаторі виникають при повторному запалюванні дуги в момент максимальної різниці напруг мережі  $u_s$  і на трансформаторі  $u_{mp}$  (момент  $t_1$  на кривій рис. 5.14). Таке повторне запалювання призводить до дій на трансформатор небезпечних зрізаних хвиль  $\Delta U$ .

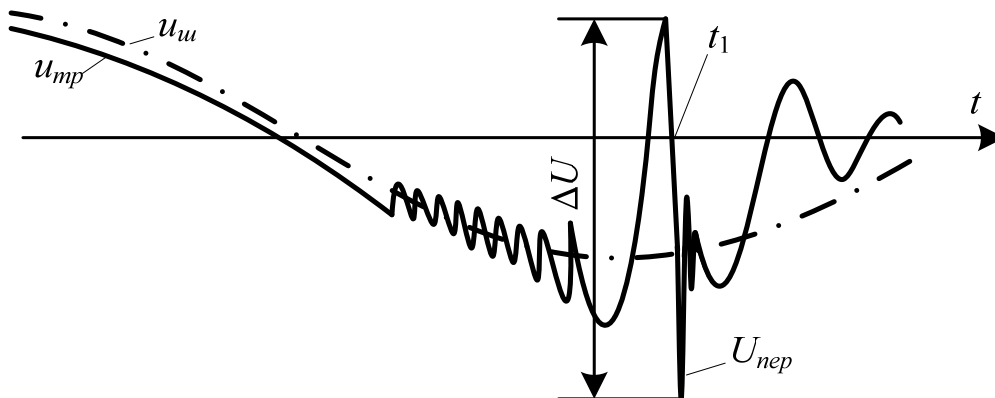


Рисунок 5.14 – Стилїзована осцилограма напруги на трансформаторі та на шинях при відключенні ненавантаженого трансформатора

На рис. 5.15 наведені криві розподілу перенапруг, отримані в дослідях відключення ненавантаженого трансформатора 110 кВ, 20 МВА повітряним вимикачем з інтенсивним обривом дуги (крива 1) і масляним вимикачем з багатократним запалюванням дугового проміжку (крива 2). Високі перенапруги, що виникають при

відключенні повітряним вимикачем, показують, що цей тип повітряного вимикача не забезпечує достатньо «м'якого» гасіння малих індуктивних струмів.

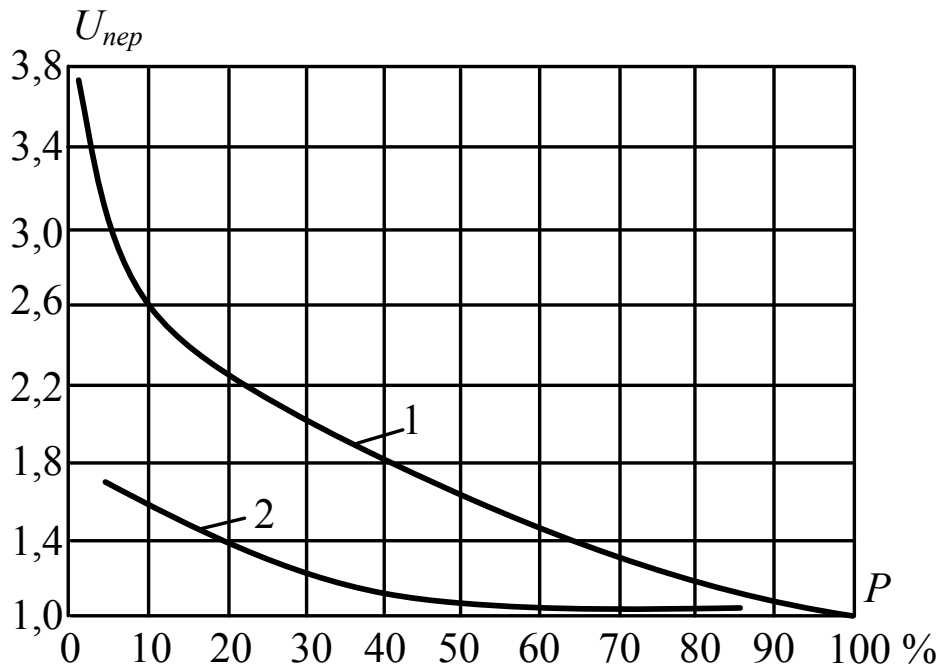


Рисунок 5.15 – Криві розподілу перенапруг при відключенні холостого ходу трансформатора 110 кВ, 20 МВА

До сучасних вимикачів висунуті вимоги не допускати повторних зрізів струму, що призводять до дуже значних комутаційних перенапруг. Зниженню останніх сприяє також використання в сучасних трансформаторах магнітопроводів із холоднокатаної сталі. Такі трансформатори мають малий струм намагнічування  $I_{\mu}$ ; цей фактор призводить до зменшення накопиченої в трансформаторі магнітної енергії. Звичайно перенапруги при відключенні трансформаторів і реакторів мають кратність 2,0 – 2,5.

Більш високі перенапруги виникають при відключенні трансформатора через малий проміжок часу після включення, коли через вимикач проходить великий струм включення. Через це таку комутацію слід вважати небезпечною для ізоляції трансформатора і не допускати в експлуатації.

Ефективним засобом обмеження перенапруг при відключеннях ненавантажених трансформаторів і реакторів служать блискавкозахисні вентильні розрядники, включені на виводах цих трансформаторів. Пробиваючись, РВ розсіюють енергію, що накопичується на ємності трансформатора  $C$ , і обмежують  $u_{mp}$  до величин, безпечних для ізоляції. Пропускна здатність звичайних блискавкозахисних РВ достатня для розсіювання цієї енергії.

При відключенні асинхронних двигунів високої напруги (3 кВ і вище) виникають перенапруги, природа яких така ж, як і при відключенні трансформаторів. При відключенні двигунів, що обертаються з номінальною швидкістю, перенапруги не перевищують  $3U_{\delta}$ . При відключенні загальмованого двигуна перенапруги значно зростають, досягаючи при відключенні повітряним вимикачем  $4,5U_{\delta}$ . Такі високі перенапруги пов'язані з різким зростанням індуктивного струму, що споживається загальмованим двигуном. В проміжних випадках, тобто при обертанні двигуна з пониженою швидкістю, перенапруги, очевидно, також будуть мати проміжні значення. Відключення повністю або частково загальмованих двигунів можливі на практиці в результаті перевантаження при відновленні напруги в мережі після відключення короткого замикання.

**Приклад 5.3** Розрахувати максимально можливу перенапругу при відключенні на стороні 110 кВ ненавантаженого трансформатора  $P = 90$  МВА,  $U_n = 110$  кВ,  $I_{\mu} = 1\%$ . Ємність обмотки 110 кВ,  $C = 2000$  пФ. Струм зрізу трансформатора  $i_{зр} = 10$  А<sub>макс</sub>.

Індуктивність обмотки буде рівною:

$$L_{\mu} = \frac{U_n^2}{\omega \cdot P \cdot I_{\mu}} = \frac{110^2}{314 \cdot 90 \cdot 0.01} = 43 \text{ Гн.}$$

Характеристичний опір:

$$z = \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}} = \sqrt{\frac{43}{2 \cdot 10^{-9}}} = 14,5 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Амплітуда струму намагнічування:

$$I_{\mu} = \sqrt{2} \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n} \cdot I_{\mu} = \sqrt{2} \frac{90 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 110} \cdot 0,01 = 6,7 \text{ А}_{\text{макс}} < i_{зр}.$$

Оскільки знаходиться максимально можлива перенапруга, приймаємо, що зріз відбувається на максимумі струму, тобто  $i_{зр} = 6,7$  А,  $u_{зр} = 0$ , звідки випливає:

$$U_{пер} = i_{зр} \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}} = 6,7 \cdot 14,5 \cdot 10^4 \cdot 10^{-3} = 980 \text{ кВ}_{\text{макс}}.$$

Отримане значення  $U_{пер}$  повністю недопустиме для обмотки 110 кВ. Практично величина  $U_{пер}$  буде обмежена пробоями міжконтактного проміжку вимикача і спрацюванням вентильного розрядника на затискачах трансформатора.

### 5.8 Ударний коефіцієнт при комутаціях

Розвиток комутаційних перенапруг пов'язаний з рядом факторів, що мають статистичний характер. До таких факторів належать: власна частота мережі в момент комутації, фаза комутації, виникнення повторних пробоев чи зрізів струму у вимикачах тощо. Внаслідок такого зв'язку самі комутаційні перенапруги, а точніше їх кратність, мають статистичний характер. Із цієї причини комутаційні перенапруги характеризуються кривими ймовірності, побудова яких базується на масових вимірюваннях в електричних мережах.

Дослідження комутаційних перенапруг на лініях показали, що ударні коефіцієнти при комутаціях мало залежать від схем мережі і довжини ліній і статистично розподіляються у відповідності з нормальним законом:

$$P(k_{y\partial}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{k_{y\partial}} e^{-\frac{(k_{y\partial}-\bar{k}_{y\partial})^2}{2\sigma^2}} dk_{y\partial} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{k_{y\partial}-\bar{k}_{y\partial}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (5.10)$$

Для кожного виду комутації, як і для всіх комутацій в цілому, можуть бути вказані середні значення  $\bar{k}_{y\partial}$  та дисперсія  $\sigma$ . Найбільші значення  $\bar{k}_{y\partial}$ , які слід практично враховувати, визначаються правилом трьох сигм:

$$k_{y\partial.макс} = \bar{k}_{y\partial} + (2 \div 3)\sigma.$$

У табл. 5.1 наведені значення  $\bar{k}_{y\partial}$  та  $\sigma$  для різних комутацій.

Маючи параметри розподілення комутаційних перенапруг  $\bar{U}_{пер}$ ,  $\sigma_{II}$  і розрядних напруг ізоляції при комутаційних імпульсах  $\bar{U}$ ,  $\sigma$ , можна порахувати число перекриттів ізоляції на лінії  $N_{пер}$  при заданому числу комутацій  $n_K$ :

$$N_{nep} = n_k \cdot [1 - (1 - P_1)^m],$$

де

$$P_1 = \frac{1}{\sigma_\Sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\bar{U}_{nep}} e^{-\frac{(\bar{U}_{nep} - \bar{U})^2}{2\sigma_\Sigma^2}} dU_{nep} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\bar{U}_{nep} - \bar{U}}{\sigma_\Sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (5.11)$$

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sigma_{II}^2 + \sigma^2};$$

$m$  – число ізоляційних проміжків на лінії.

Таблиця 5.1 – Параметри статистичних розподілів ударних коефіцієнтів

Вид комутації	Параметри розподілу	
	Середній ударний коефіцієнт $\bar{k}_{\text{од}}$	Дисперсія $\sigma$
1. Включення лінії на холостий хід	1,61	0,183
2. Відключення ненавантаженої лінії вимикачем (баковим) з повторним запалюванням	2,0	0,34
3. Вимикання лінії в циклі ТАПВ (вимикач з відокремлювачем)	1,57+0,55 $k_q$ *	0,28
4. Відключення лінії в циклі ОАПВ	1,6	0,18

\* Примітка:  $k_q$  – коефіцієнт остаточної напруги на ПЛ

**Приклад 5.4** Визначити для умов комутації при ТАПВ, вказаних в прикладі 5.2, максимальне значення  $U_{nep}$  у відповідності з правилом двох сигм.

При  $\Delta t = 0,4$  с коефіцієнт  $k_q = 0,6$ . За формулою, наведеною у п. 3 табл. 5.1:

$$\bar{k}_{\text{уд}} = 1,57 + 0,55 \cdot 0,6 = 1,9$$

та

$$\bar{k}_{\text{уд.макс}} = 1,9 + 2 \cdot 0,28 = 2,46.$$

Максимальна перенапруга рівна:

$$U_{пер} = E_{уст} \cdot k_{уст} \cdot k_{уд.макс} = E \cdot k_C \cdot k_3 \cdot k_{уд.макс} = \\ = 1,1 \cdot 1,26 \cdot 1,2 \cdot 2,46 = 4,09.$$

Це є дуже висока перенапруга. При виборі ізоляції ПЛ орієнтуються на значення, близькі до середніх, а не максимальних значень.

### 5.9 Міжфазні комутаційні перенапруги

Дані про кратності перенапруг, що викладені в попередніх параграфах, стосувалися перенапруг на фазах; на їх основі вибирається фазна ізоляція ліній і підстанцій. Важливі також дані про міжфазні перенапруги для вибору міжфазної ізоляції. Перенапруга між фазами  $u_{пер.мф}$  рівна різниці перенапруг на фазах  $u_{пер.ф}$ . Статистичному розкиду  $U_{пер.ф}$  відповідає статистичний розкид  $U_{пер.мф}$ , який ускладнений розкидом дій фаз вимикача. Очевидно, що найбільші  $U_{пер.мф}$  виникають при такому процесі на фазах, коли у момент максимуму  $u_{пер.ф}$  їх полярності на різних фазах протилежні. Дослідження показали, що між середніми значеннями ударних коефіцієнтів перенапруг на фазах  $\bar{k}_{уд.ф}$  і між фазами  $\bar{k}_{уд.мф}$  існує майже прямолінійний кореляційний зв'язок. Цей зв'язок показаний на рис. 5.16 для комутації включення лінії і включення в циклі АПВ. Розкид дослідних точок укладається в заштриховані області. В середньому можна прийняти, що:

$$\bar{k}_{уд.мф} = 0,85 \cdot \bar{k}_{уд.ф}.$$

З урахуванням того, що  $U_{мф} = \sqrt{3} \cdot U_{ф}$ , отримуємо:

$$\bar{U}_{пер.мф} = 0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_{пер.ф} = 1,45 \cdot \bar{U}_{пер.ф}.$$

Міжфазна ізоляція складається з проміжків з електродами симетричної форми (наприклад, провід–провід і т. д.), що значно піднімає їх розрядну напругу. З цієї причини міжфазні проміжки на підстанціях, де можна не враховувати розгойдування проводів, приймаються близькими до фазних.



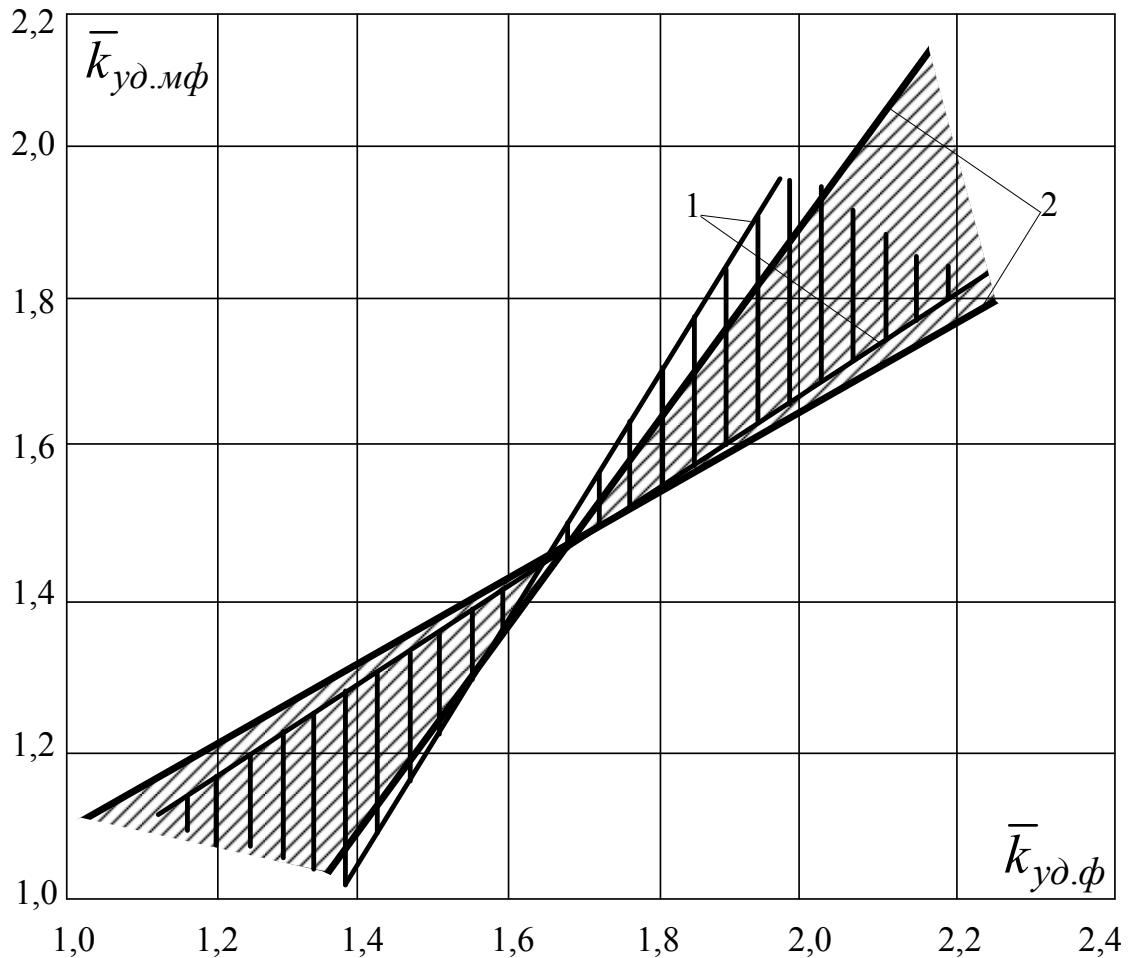


Рисунок 5.16 – Залежність (лінії регресії) між середніми ударними коефіцієнтами перенапруг між фазами  $\bar{k}_{уд.мф}$  та на фазах  $\bar{k}_{уд.ф}$ ;  
 1 – для включення лінії; 2 – для включення лінії в циклі АПВ

## 5.10 Обмеження комутаційних перенапруг

### 5.10.1 Шунтувальні опори у вимикачах двоступеневої дії

В даний час в практиці всіх країн намітилася тенденція до встроювання у вимикачі шунтувальних опорів  $R_{\phi}$ . Шунтувальні опори служать для обмеження швидкостей і амплітуд відновлювальних напруг і обмеження амплітуд комутаційних перенапруг.

Дві принципові схеми виконання вимикачів з  $R_{\phi}$  наведено на рис. 5.17. У обох схемах відключення відбувається в такому порядку: першими розривають струм головні дугогасильні контакти 1, які шунтовані опором  $R_{\phi}$ ; після гасіння дуги головними контактами в ланцюзі проходить залишковий струм, обмежений опором  $R_{\phi}$ ; цей струм обривається додатковими контактами 2. Перевага першої схеми на рис. 5.17,а полягає в тому, що у включеному положенні вимикача

через контакти 2 робочий струм не проходить і вони можуть виконуватися полегшеними. Недоліком цієї схеми є необхідність підтримування стисненим повітрям повної ізоляції між головними дугогасильними контактами 1 при відключеному положенні вимикача. У другій схемі (рис. 5.17,б) робочий струм проходить через допоміжні контакти 2, і це є її недоліком в порівнянні з першою схемою. Зате в другій схемі після обриву дуги на обох контактах головні контакти 1 знов змикаються, а розрив ланцюга підтримується (стиснутим повітрям) між допоміжними контактами 2.

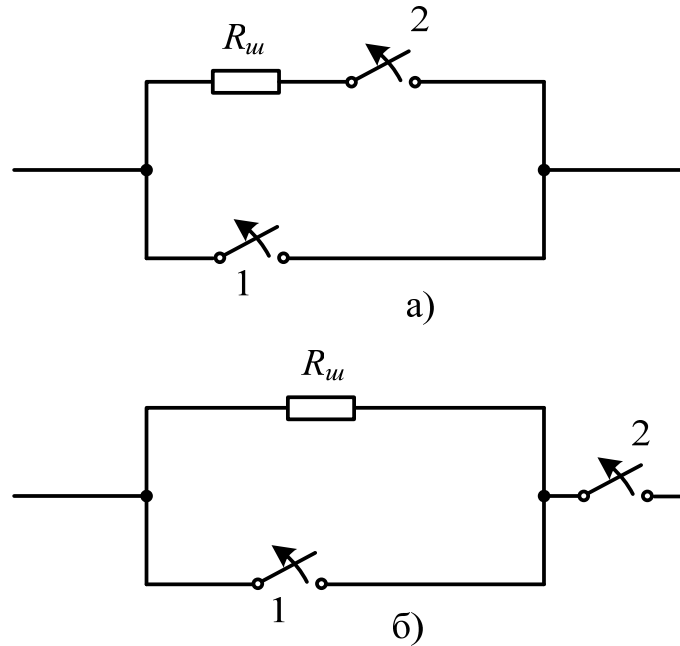


Рисунок 5.17 – Варіанти виконання вимикачів з шунтувальними опорами  $R_{\phi}$

Сучасні повітряні вимикачі виконуються багатоступінчатими. Повітряні вимикачі серії ВВБ (завод «Електроапарат») мають номінальну напругу ступеня (модуля) 50-55 кВ. На кожному ступені повторюється схема, наведена на рис. 5.17,а. Шунтувальні опори можуть мати величину 100 Ом на ступінь, можливе зниження цих опорів до декількох десятків Ом.

**Відключення коротких замикань.** Важлива роль шунтувальних опорів  $R_{\phi}$  полягає в обмеженні швидкості зростання і амплітуди відновлювальної напруги  $u_{\phi}$  при відключенні к.з., зокрема найбільш небезпечних невіддалених коротких замикань (див. підрозділ 5.4). При розриві струму основними контактами 1 опір  $R_{\phi}$  демпфує коливання в контурах або знижує хвильові опори  $z_0$  та  $z_n$ . Чим нижчий опір  $R_{\phi}$ , тим більш ефективно обмежується ш.в.н. Проте, з іншого боку, чим нижчий  $R_{\phi}$ , тим вище ш.в.н. у другому циклі – при відключенні віддільника 2 і тим важча конструкція  $R_{\phi}$  і

віддільника. Оптимальне значення  $R_{\phi}$  – близько сотень і десятків Ом. Шунтувальні опори такого порядку ефективні також для обмеження відновлювальних і комутаційних перенапруг при розриві електропередачі в асинхронному режимі.

**Відключення ненавантажених ліній.** При відключенні ненавантаженої лінії роль шунтувального опору  $R_{\phi}$  полягає в запобіганні повторним пробоям у вимикачі шляхом обмеження амплітуди відновлювальної напруги на контактах 1 вимикача. Після обриву дуги на контактах 1 залишковий заряд на ємності лінії стікає через опір  $R_{\phi}$  і індуктивність мережі в землю, що призводить до зниження  $u_{\phi}(t)$ .

На рис. 5.18 показано сімейство кривих  $u_{\phi}(t)$  в частках напруги джерела  $E$  для типової лінії 220 кВ. Як видно з кривих, щоб домогтися амплітуди  $u_{\phi}$ , що не перевищує  $E$ , потрібно значення  $R_{\phi} \leq 3$  кОм.

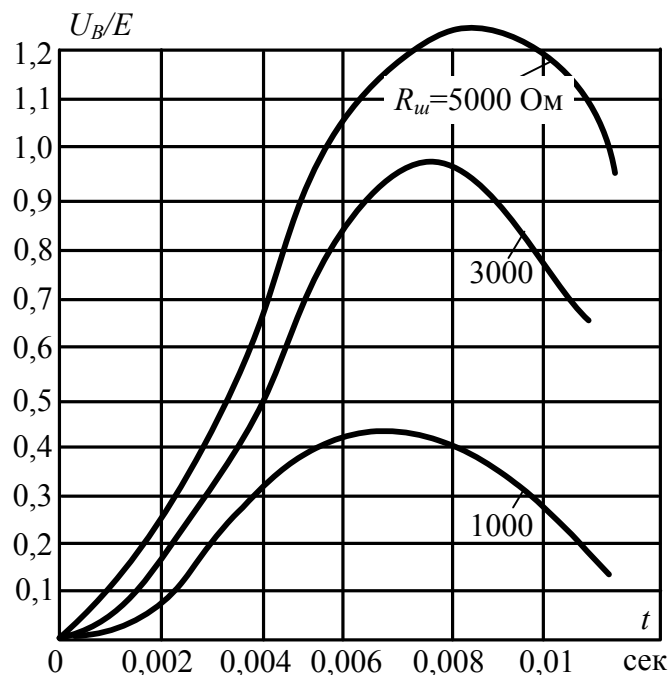


Рисунок 5.18 – Криві відновлювальної напруги на головних контактах вимикача при відключенні ненавантажених ліній в залежності від величини  $R_{\phi}$ ;  $l = 200$  км

**Включення лінії в циклі АПВ.** У підрозділі 5.3 було показано, що перенапруги при включенні лінії в циклі АПВ досягають небезпечних значень унаслідок збереження на лінії залишкових зарядів. Можна розрядити лінію через  $R_{\phi}$  і тим самим різко понизити перенапруги. Заряд, що стікає з лінії ємністю  $C$  зарядженої до напруги  $U$ , рівний:

$$q = \int_0^{\Delta t} i dt = \int_0^{\Delta t} \frac{U_0}{R_\theta} \cdot e^{-\frac{t}{T}} dt$$

де  $\Delta t$  – інтервал увімкнення  $R_\theta$ ,  $T = R_\theta C$ .

Підставляючи значення  $T$  і виконуючи інтегрування, отримаємо:

$$q(\Delta t) = U_0 \cdot C \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right). \quad (5.12)$$

В циклі АПВ допоміжні контакти або відокремлювач (див. рис. 5.17) відключаються із запізнюванням  $\Delta t$  відносно головних контактів. Прийmemo, що  $\Delta t = 0,15$  с,  $C = 3$  мкФ ( $l = 300$  км). Якщо прийняти  $\Delta t = 2T$ , то згідно з формулою (5.12) за інтервал  $\Delta t$  пройде близько 90% залишкового заряду лінії. При цих співвідношеннях  $R_\theta = 25$  кОм. Такі величини вже наближаються до значень опорів подільника для вимірювання напруги між розривами вимикача. Таким чином, найбільш небезпечні перенапруги при АПВ можуть бути ефективно обмежені навіть високоомними, а отже малопотужними шунтувальними опорами.

**Включення ненавантажених ліній.** Перенапруги при включенні ліній досягають небезпечних значень на лініях 330-1150 кВ внаслідок знижених рівнів ізоляції на цих лініях і великих довжин ліній. Тому останніми роками стали приділяти увагу зниженню  $U_{i\dot{a}\delta}$  при включенні ліній (мається на увазі включення без залишкових зарядів на лінії в циклі АПВ). З цією метою було запропоновано виконувати вимикачі з  $R_\theta$  двосторонньої дії. У цій конструкції  $R_\theta$  запобігає виникненню небезпечних перенапруг як при відключенні, так і при включенні ліній. У схемі вимикача (рис. 5.17,а) для цього необхідно, щоб процес включення протікав в такій послідовності: спочатку замикаються допоміжні контакти 2 з  $R_\theta$ , а потім головні контакти 1. У схемі на рис. 5.17,б операція включення повинна відбуватися в такій послідовності: спочатку розмикаються головні контакти, потім замикаються допоміжні контакти 2, після чого знов замикаються контакти 1. В обох схемах при включенні контактів 2 ємності  $C$  заряджають через опір  $R_\theta$ . Чим вищий опір  $R_\theta$ , тим нижча  $U_{i\dot{a}\delta}$  цій комутації. Проте з підвищенням  $R_\theta$  росте  $U_{i\dot{a}\delta}$  при замиканні головних контактів 1 і шунтуванні  $R_\theta$ .

Вплив  $R_\phi$  на перенапруги при включенні лінії ілюструється рис. 5.19, на якому наведені криві, обчислені для повторного включення лінії вимикачами з  $R_\phi$  і без нього. В обох випадках передбачалося, що напруга, яка залишається на лінії до моменту повторного включення,  $U_0 = 1$ . Фактично, якщо вимикач забезпечений шунтувальним опором, то  $U_0$  буде суттєво нижча, що додатково знижує перенапругу.

Оптимальні значення  $R_\phi$ , що забезпечують мінімальні перенапруги при включенні лінії, складають 500-1000 Ом при довжинах ліній відповідно 400-200 км.

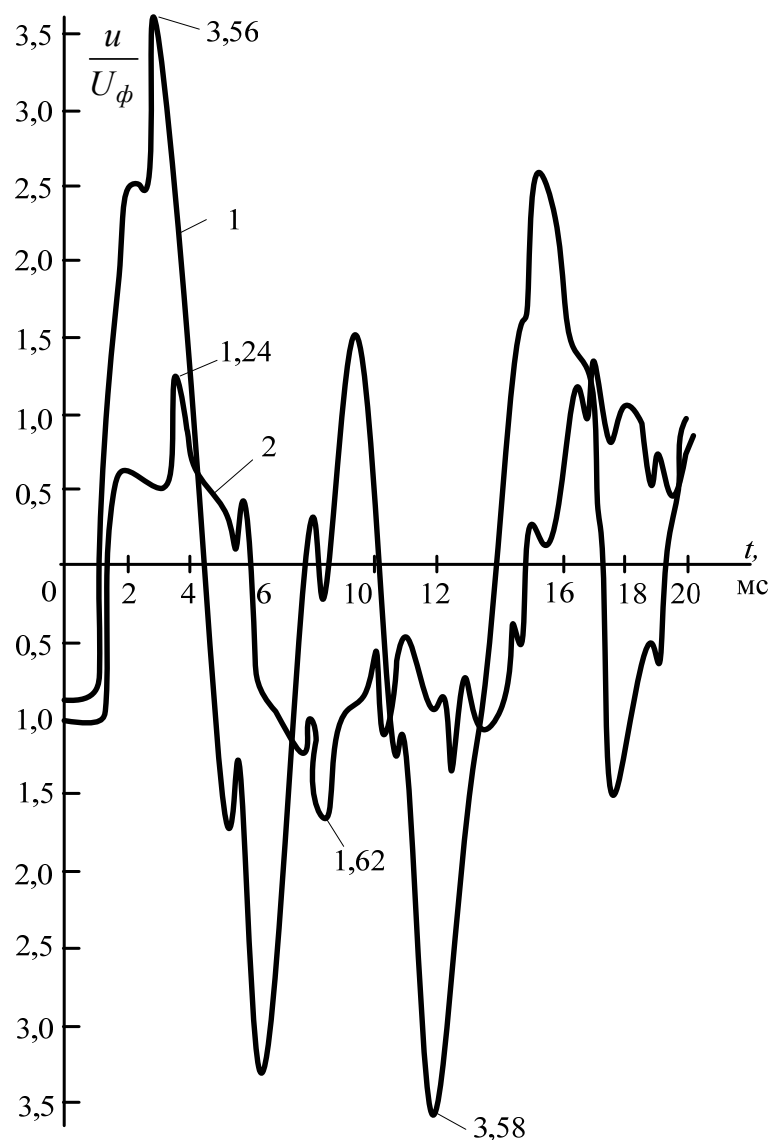


Рисунок 5.19 – Криві напруги на лінії довжиною 340 км при її АПВ вимикачем. Напруга, що залишається на лінії до моменту АПВ, прийнята рівною 1: тривалість введення  $R_\phi$  на включення 4 мс;

1 – без  $R_\phi$  ; 2 – з  $R_\phi = 400$  Ом

### Відключення ненавантажених трансформаторів.

Шунтувальні опори можуть служити також для обмеження перенапруг при відключенні малих індуктивних струмів. У першому циклі відключення (розрив головних контактів) паралельно шляху проходження струму  $i_{zp}$ , що обривається, включений опір  $R_{\theta}$ . У цьому циклі перенапряга на контактах вимикача не перевищить  $i_{zp} R_{\theta}$ . В другому циклі відключення роль  $R_{\theta}$  полягає в обмеженні струму і згладжуванні коливань при виникненні повторних запалювань. Цій умові відповідає нерівність  $R_{\theta} \leq \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{L_{\mu}}{C}}$ . Відповідно значення характеристичних опорів трансформаторів  $R_{\theta}$  повинно бути декілька десятків кОм.

З викладеного видно, що складно вибрати  $R_{\theta}$ , який задовольняє всі вимоги. Для обмеження ш.в.н. при к.з. і перенапрягах при включенні ліній необхідні низькоомні  $R_{\theta}$ . Такі ж  $R_{\theta}$  запобігають повторним пробоям при відключенні ненавантажених ліній. Для обмеження перенапруг при відключенні малих індуктивних струмів необхідні високоомні  $R_{\theta}$ . Такі ж  $R_{\theta}$  можна використовувати для обмеження перенапруг при АПВ.

Із зростанням номінальної напруги росте число розривів  $n$  у вимикачі, і якщо  $\Delta R_{\theta}$  – шунтувальний опір одного розриву, то  $R_{\theta} = n\Delta R_{\theta}$ . З іншого боку, з ростом номінальної напруги знижується хвильовий опір лінії, збільшується їх довжина і ємність і, відповідно, дещо знижується необхідне значення  $R_{\theta}$ . Тому значення  $\Delta R_{\theta}$  має знижуватися пропорційно номінальній напрузі вимикача. Виконання цієї умови приводить до пропорційного зростання потужності опору  $\Delta R_{\theta}$  з ростом  $U_i$  і неуніфікованому виконанню цих опорів для вимикачів різної номінальної напруги. Тому завод-виробник часто виготовляє вимикачі з незмінним  $\Delta R_{\theta}$ , що приводить до погіршення захисної дії шунтувального опору у вимикачах високої номінальної напруги.

Ефективним засобом поліпшення захисної дії шунтувальних опорів є використання для їх виготовлення матеріалів з нелінійною вольт-амперною характеристикою виду  $u = C \cdot i^{\alpha}$ . Шунтування вимикача такими опорами тим ефективніше, чим нижче коефіцієнт вентильності  $\alpha$ . Основна складність пов'язана з конструюванням нелінійних опорів, полягає в необхідності забезпечити для них високу пропускну здатність.

### 5.10.2 Розрядники для обмеження комутаційних перенапруг

Коефіцієнт імпульсу вентильного розрядника близький до одиниці, тому можна вважати, що розрядна напруга іскрового проміжку РВ при комутаційних перенапругах рівна розрядній напрузі при промисловій частоті.

Грозазахисні розрядники РВМГ розраховані на проходження струму до 400 А при тривалості 2000 мкс. У мережах 110-220 кВ струми комутаційного походження звичайно не перевершують цих значень. Отже, в мережах 110-220 кВ розрядники РВМГ можуть бути використані для обмеження комутаційних перенапруг.

У електропередачах 330 кВ і вище комутаційні струми в РВ досягають 1000-2000 А при тривалості в 1-2 півперіоди промислової частоти. Розрядник повинен гасити супроводжувальний струм робочої частоти при високих напругах гасіння, можливих при комутаціях в системі. Ці умови звичайні блискавкозахисні розрядники вже не задовольняють, у зв'язку з чим в Україні випускаються комбіновані магнітно-вентильні розрядники РВМК для захисту від комутаційних і грозових перенапруг. Розрядники РВМК випускаються на напруги 330-750 кВ. Іскрові проміжки розрядника РВМК мають ту ж конструкцію (з дугою, що обертається), що і грозові розрядники. Робочий опір складається з тервитових дисків, що мають у декілька разів більшу пропускну здатність, ніж вилитові диски. Проте коефіцієнт нелінійності тервита дещо гірший, ніж вилита.

Внаслідок високих коефіцієнтів нелінійності залишкова напруга на робочому тервитовому опорі при проходженні розрахункового імпульсного грозового струму (10 кА) перевищує допустиме значення. Для зниження цієї напруги використовується схема, яка показана на рис. 5.20. Ця схема побудована з розрахунку на вищі напруги гасіння при розвитку комутаційних перенапруг  $U_{\text{вип.г.}}$ , ніж при грозових перенапругах  $U_{\text{гас.гр.}}$ . Розрядник діє таким чином. При комутаційних перенапругах працюють іскровий проміжок 1 і робочий опір 2. Струм в робочому опорі 2" ( $I \leq 1500$  А) недостатній для спрацьовування іскрового проміжка 3.

Опір 2 обмежує супроводжувальний струм при напрузі  $U_{\text{гас.к.}}$  до значення, при якому він гаситься іскровими проміжками 1. При атмосферних перенапругах і проходженні через опір 2" імпульсного струму 2000 А спрацьовує іскровий проміжок 3 і робочий опір РВ обмежується ділянкою 2'. Ця ділянка в той же час обмежує супроводжувальний струм при напрузі  $U_{\text{гас.гр.}}$  до необхідної для гасіння величини.

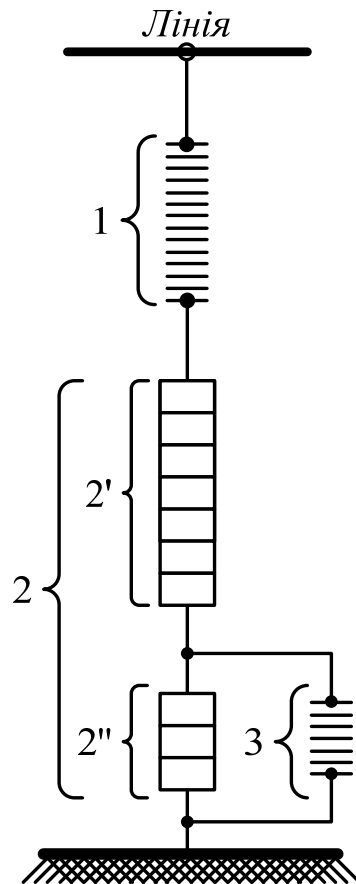


Рисунок 5.20 – Принципова схема комбінованого розрядника РВМК  
 1 – основний іскровий проміжок; 2 – основний робочий опір розрядника; 2' – робочий опір грозової частини розрядника; 2'' – шунтована частина робочого опору; 3 – додатковий (шунтувальний) іскровий проміжок

Вольт-амперна характеристика комбінованого розрядника РВМК-500 наведена на рис. 5.21 (жирна лінія). Вона складається з відрізків характеристик робочого опору 2 (крива 1) і опору 2' (крива 2). При проходженні струму  $I = 1500$  А залишкова напруга на РВМК-500 складає 1050 кВ, або  $2,5U_{\phi}$ . Пробивна напруга іскрового проміжку розрядника при промисловій частоті або комутаційних імпульсах складає  $2,25U_{\phi}$ .

Таким чином, розрядник РВМК-500 обмежує амплітуди комутаційних перенапруг до  $(2,25 \div 2,5)U_{\phi}$ . Напруга гасіння розрядника  $U_{\text{гас.к.}} = 485$  кВ, тобто  $1,6U_{\phi}$ .

У дальніх електропередачах напруга промислової частоти при розриві передачі може перевищувати  $1,6U_{\phi}$ . В цьому випадку необхідні спеціальні заходи обмеження напруги.



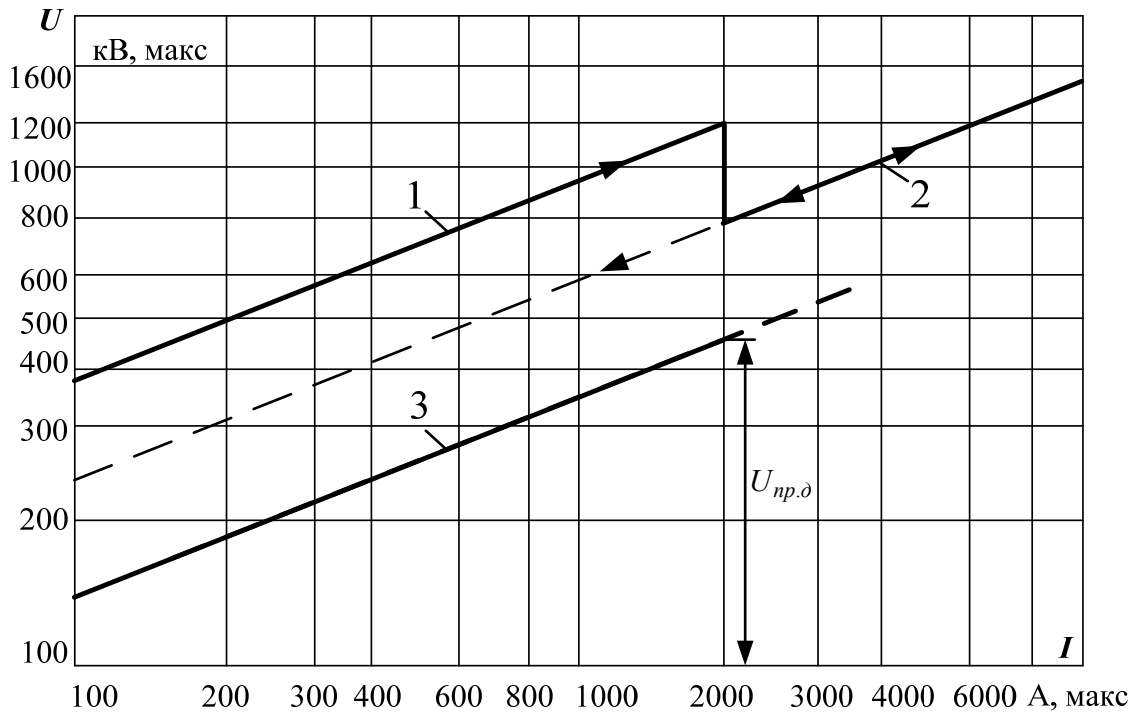


Рисунок 5.21 – Вольт-амперні характеристики комбінованого вентиляного розрядника 500 кВ.

1, 2, 3 – характеристики робочих опорів 2, 2', 2";  $U_{np.д}$  – пробивна напруга додаткового іскрового проміжку

Можливо також виконання іскрових проміжків комутаційних розрядників за схемою, показаною на рис. 5.22, що забезпечує стовідсоткову відновлювану ізоляцію іскрового проміжку.

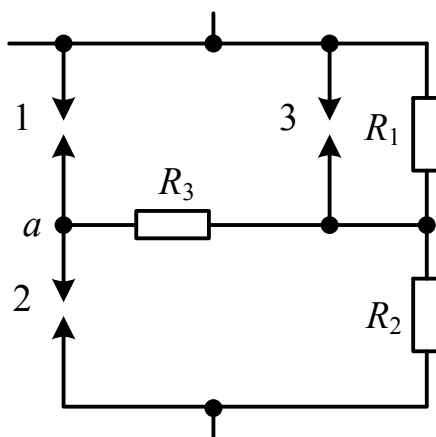


Рисунок 5.22 – Принципова схема комплекту іскрового проміжку розрядника з магнітним дугогасінням та стовідсотковою відновлюваною ізоляцією. 1, 2 – робочі іскрові проміжки розрядника; 3 – додатковий іскровий проміжок

Робота схеми, наведеної на рис. 5.22, полягає в тому, що під дією перенапруги спрацьовує проміжок 3, і високий потенціал через

високоомний опір  $R_3$  подається в точку  $a$ . Під дією цього потенціалу спрацьовує проміжок 2, точка  $a$  набуває нульового потенціалу і спрацьовує проміжок 1. Комутаційний струм відводиться через вентиляльні опори і проміжки 1 і 2. На цих проміжках гаситься супроводжувальний струм робочої частоти. У проміжку 3 струм обмежується високоомним опором  $R_3$  до декількох ампер і легко гаситься. Таким чином, в схемі на рис. 5.22 напруга спрацьовування розрядника встановлюється проміжком 3, а напруга гасіння – проміжками 2 і 1. Це дозволяє вибрати верхню межу напруги гасіння майже рівною нижній межі напруги спрацьовування РВ. Розрядники цього типу маркуються як РВМКП.

Комбіновані магнітно-вентильні розрядники призначені для встановлення на лініях. На підстанціях 330-1150 кВ комутаційні струми через РВ істотно нижчі, ніж на лініях; нижча також і напруга гасіння. Тому на підстанціях 330-1150 кВ блискавкозахисні розрядники РВМГ в змозі обмежити також комутаційні перенапруги.

### 5.10.3 Вплив реакторів і трансформаторів напруги на розвиток комутаційних перенапруг

В ряді схем при відключенні ліній електропередачі на них залишаються приєднаними реактори поперечної компенсації і трансформатори напруги. По індуктивності цих елементів залишкові (вільні) заряди на проводах лінії, що відключається, можуть стікати в землю. В результаті знижуються відновлювальні напруги і комутаційні перенапруги при відключенні лінії вимикачем з повторними пробоями і при включенні лінії в циклі АПВ.

У схемі з реактором після обриву струму у вимикачі напруга на лінії не залишається постійною, як в схемі без реакторів, а має

коливальний характер з власною частотою  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{x_p \cdot b_l}}$ .

Власна частота  $\omega_0$  близька до робочої (звичайно дещо нижча, оскільки реактори Р компенсують тільки частину ємності лінії).

Криві напруг на лінії і на вимикачі показані на рис. 5.23. З цих кривих видно, що через півперіоду, коли за відсутності реакторів можна чекати найбільш небезпечного повторного запалення, відновлювальна напруга в даній схемі тим менша, чим ближче частота  $\omega_0$  до робочої частоти. Дослідження показали, що при  $\omega_0 \approx 0,8$  і повторному пробойі в найсприятливіший момент кратність перенапруг знижується до 1,5–2,0.

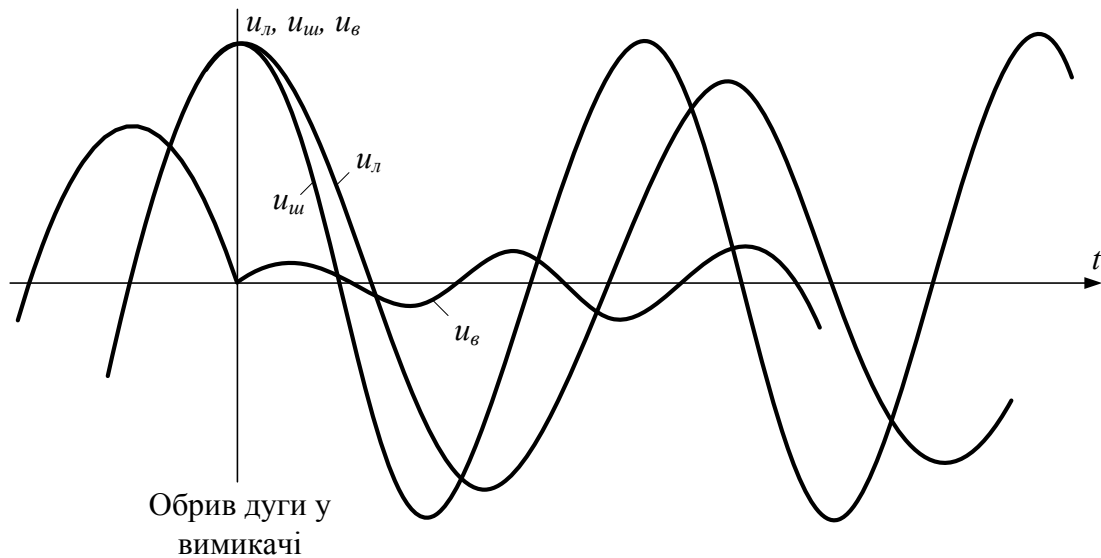


Рисунок 5.23 – Криві напруг на шинах  $u_{\phi}$  на лінії  $u_l$  і на контактах вимикача  $u_e$  при відключенні лінії з реактором поперечної компенсації

При повторному включенні в циклі АПВ за час безструмової паузи коливання на лінії сильно згасають і початкова напруга  $U_0$  до моменту повторного включення знижується. Тим самим обмежуються перенапруги при повторному включенні.

У схемі з електромагнітним трансформатором напруги заряд лінії після обриву струму у вимикачі стікає через нелінійну індуктивність трансформатора напруги. Магнітну характеристику індуктивності, що насичується, можна подати у вигляді ламаної, показаної на рис. 5.24,а. Коли потік досягає значення  $\psi_{нас}$  індуктивність трансформатора змінюється стрибком з дуже високого значення нормального режиму  $L_n$  до малої величини  $L_{нас}$  в режимі насичення. Цей процес можна умовно подати у вигляді схеми заміщення, показаної на рис. 5.24,б.

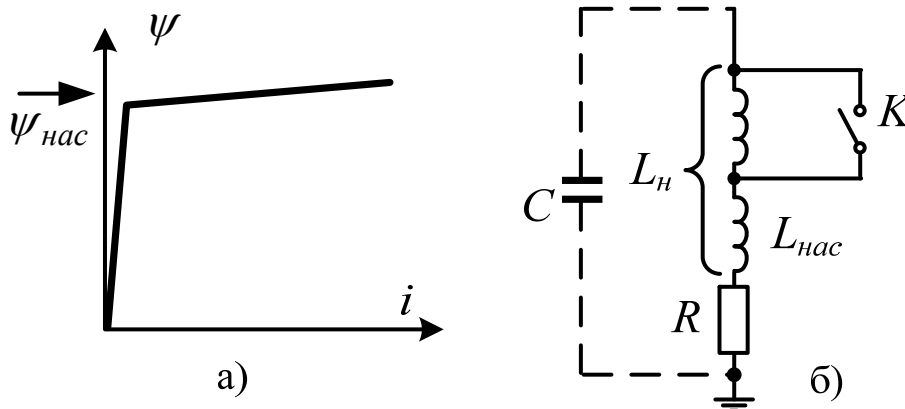


Рисунок 5.24 – Крива намагнічування (а) і розрахункова схема (б) насичення індуктивності трансформатора напруги

Замикання ключа  $K$  знижує індуктивність ланцюга з  $L_n$  до  $L_{нас}$ . Послідовно включено активний опір  $R$  обмотки трансформатора. Замикання ключа  $K$  відбувається, коли потік  $\psi$  індуктивності  $L$  досягає значення  $\psi_{нас}$ .

Напруга на індуктивності, що насичується до точки насичення, рівна:

$$u = \frac{d\psi}{d\tau} \approx \frac{\psi_{нас}}{\Delta\tau},$$

де  $\Delta\tau$  – час від моменту включення схеми на джерело з постійною напругою  $U_0$  (момент обриву струму у вимикачі) до моменту, коли потік  $\psi$  виявиться рівним  $\psi_{нас}$ , тобто до моменту замикання ключа  $K$ . Вважаючи, що в цей час напруга на ємності  $C$  не змінюється, знаходимо:

$$\Delta\tau = \frac{\psi_{нас}}{U_0}.$$

Припустимо тепер, що в робочому (синусоїдальному) режимі індукція в магнітопроводі близька до точки насичення, що дозволяє прийняти  $U_0 = \omega \cdot \psi_{нас}$ . Отже  $\Delta\tau = \frac{1}{\omega} \approx \frac{1}{3}$  півперіоду робочої частоти.

Таким чином, через  $\Delta\tau = \frac{1}{3}$  в схемі заміщення на рис. 5.24 відбувається замикання ключа  $K$ , внаслідок чого ємність  $C$  розряджається через малу індуктивність  $L_{нас}$  і активний опір  $R$ . Розряд ємності носить характер сильно згасаючих нелінійних коливань (для ліній 110-220 кВ) або є аперіодичним (для ліній 500 кВ).

Опори  $R$  трансформаторів напруги складають приблизно 25 Ом на 1 кВ номінальної напруги. Так, наприклад, НКФ-500 має  $R = 12,5$  кОм. Такий опір цілком достатній для повного розряду ємності лінії за час безструмової паузи при АПВ. Отже, електромагнітні трансформатори напруги служать ефективним засобом запобігання найбільш небезпечним перенапругам при повторних включеннях. Прикладом цього можуть слугувати ЛЕП 500 кВ, на яких встановлені трансформатори напруги НКФ-500 і не встановлені розрядники РВМК. На цих лініях автоматичні катодні

осцилографи не записали перенапруг вище  $2,5U_{\phi}$ . На напругах 110-220 кВ електромагнітні трансформатори напруги ефективно обмежують також перенапруги при відключенні ліній вимикачами з повторними пробоями.

У мережах 330-1150 кВ застосовуються найбільш економічні ємнісні трансформатори напруги. Ці трансформатори, очевидно, не можуть відвести заряди з лінії. Тому при їх використанні особливо доцільно виконання вимикачів з дешевими високоомними шунтувальними опорами, здатними розряджати лінію за безструмову паузу циклу АПВ.

## 6. ПЕРЕНАПРУГИ ПРИ ЗАМИКАННЯХ НА ЗЕМЛЮ

### 6.1 Нестійке горіння заземлювальної дуги і розвиток перенапруг

Металеве замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю приводить до підвищення напруги на здорових фазах до  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$  (за відсутності 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  $b_\phi$  і створює на нейтралі напругу зсуву  $U_{zc}$ .

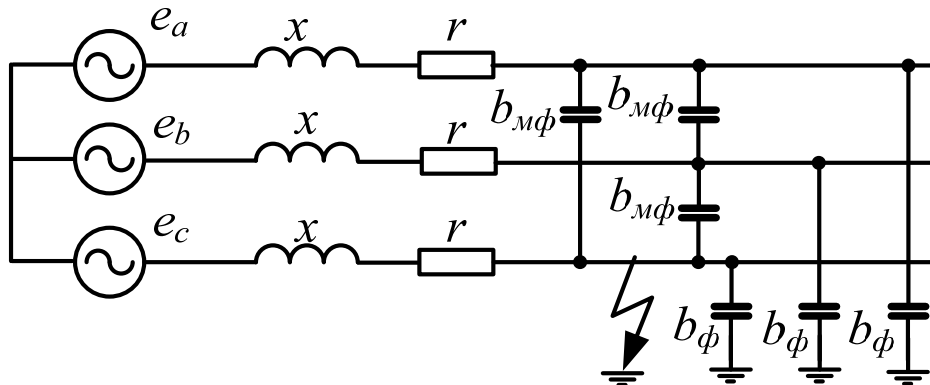


Рисунок 6.1 – Трифазна система з ізолюваною нейтраллю при дуговому замиканні на землю

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  $a$  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  $U_{n.z.}$ . Величина цього піка обмежена відновленням ізоляції дугового проміжку. Найбільша величина  $U_{n.z.}$  виникає, якщо дуга гаситься в момент мінімуму напруги  $e_a + U_{zc}$  на фазі, як це показано на рис. 6.2. В цьому випадку  $U_{n.z.} = 2 \cdot (U_{zc} - U_\phi)$ , звідки:

$$U_{zc} = U_\phi + \frac{U_{n.z.}}{2}. \quad (6.1)$$

Коливальне відновлення напруги на ураженій фазі  $a$  не призводить до негайного повторного запалювання дуги лише в тому випадку, якщо  $U_{n.z.}$  буде менше відновлювальної ізоляції дугового проміжку. Обробка багатьох осцилограм, знятих під час спеціальних дослідів в мережі 6-10 кВ, показала, що максимальна величина  $U_{n.z.}$

обмежена ізоляцією дугового проміжку і становить  $0,4U_\phi$ . Тоді з формули (6.1) знаходимо, що максимальна величина  $U_{zc}$  рівна  $1,2U_\phi$  (додатного або від'ємного знака).

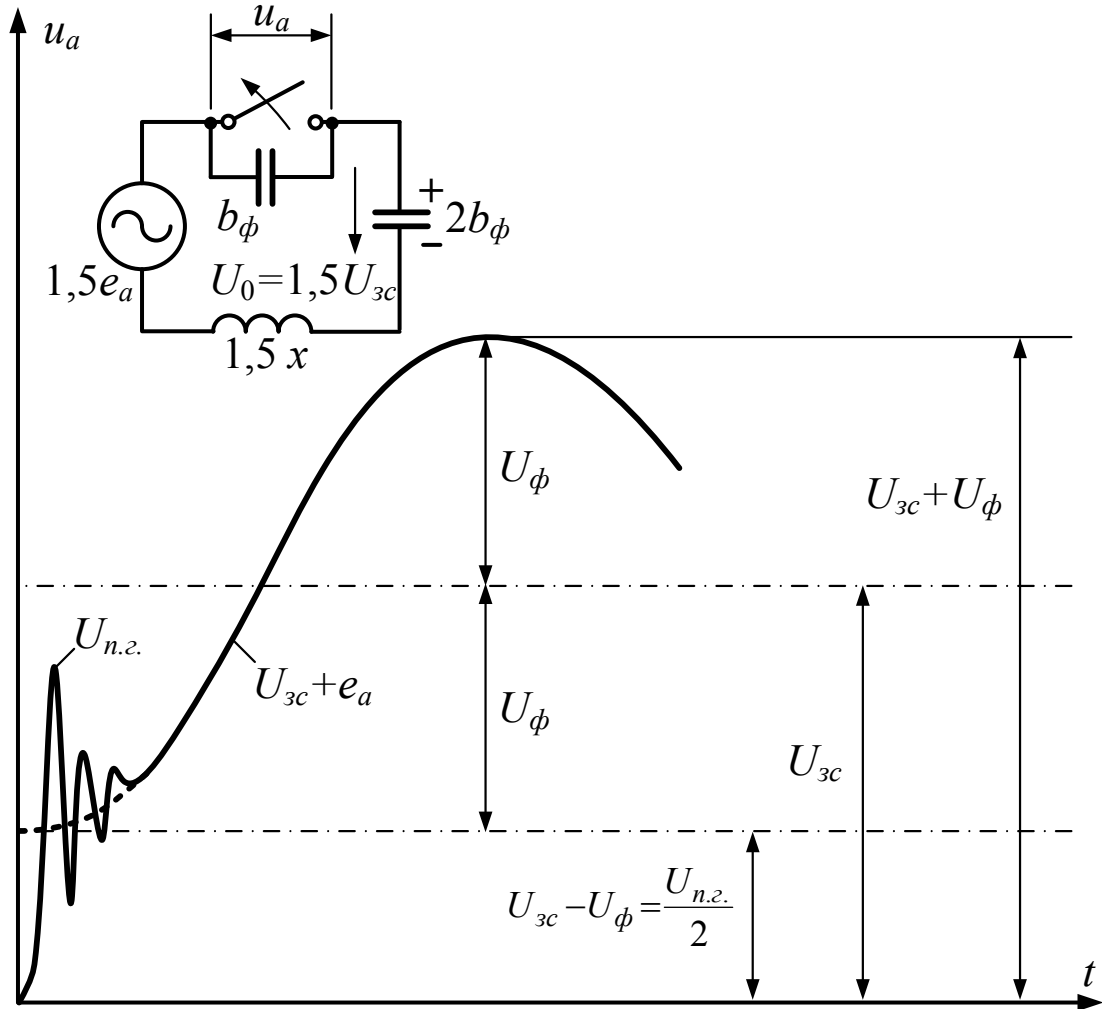


Рисунок 6.2 – Відновлення напруги на ушкодженій фазі при гасінні емнісної дуги замикання на землю

Визначимо тепер можливі перенапруги в трифазній мережі (див. рис. 6.1). Величина перенапруги визначається за формулою:

$$u_{пер} = u_{уст} + (u_{уст} - u_n) \cdot \frac{b_\phi}{b_\phi + b_{мф}} \cdot (1 - d), \quad (6.2)$$

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



$\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{m\phi}}$  – 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

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

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

$$u_{уст} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \sin\left(\tau + \psi + \frac{\pi}{6}\right).$$

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

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

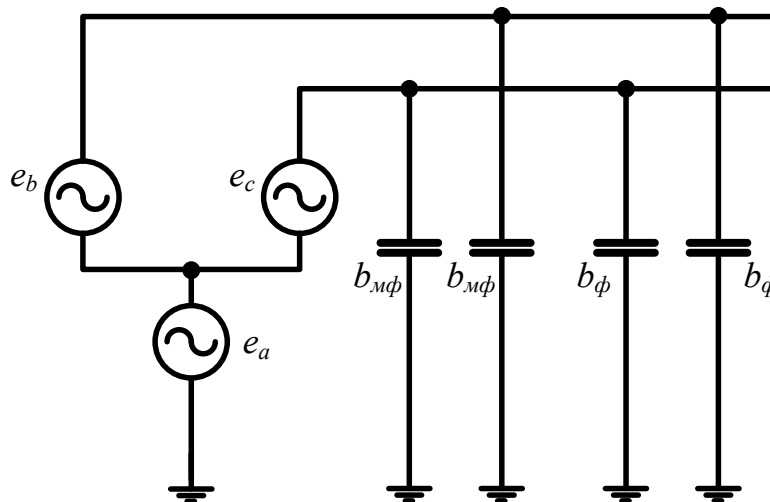


Рисунок 6.3 – Перетворення схеми рис. 6.1, що ілюструє зниження  $u_{пер}$

При таких з'єднаннях відбувається перерозподіл вільного заряду між ємностями і зниження напруги вільних коливань  $u_{\phi} = u_n + u_{уст}$

відповідно до коефіцієнта  $\frac{b_{\phi}}{b_{\phi} + b_{м\phi}}$ . Значення коефіцієнта для ліній  $\leq$

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  $U_{зс} = -1,2 \cdot U_{\phi}$ . Максимальна перенапряга на здоровій фазі виникає при повторному запалюванні поблизу максимуму напруги  $u_{уст}$ ; досить близьке значення ми одержимо, якщо для спрощення розрахунку прийmemo, що повторне запалювання відбувається точно в момент максимуму  $u_{уст}$ . Тоді

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

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

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

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

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

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 ємнісного струму дуга стає більш стійкою, що веде до зниження імовірності виникнення високих перенапруг.

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

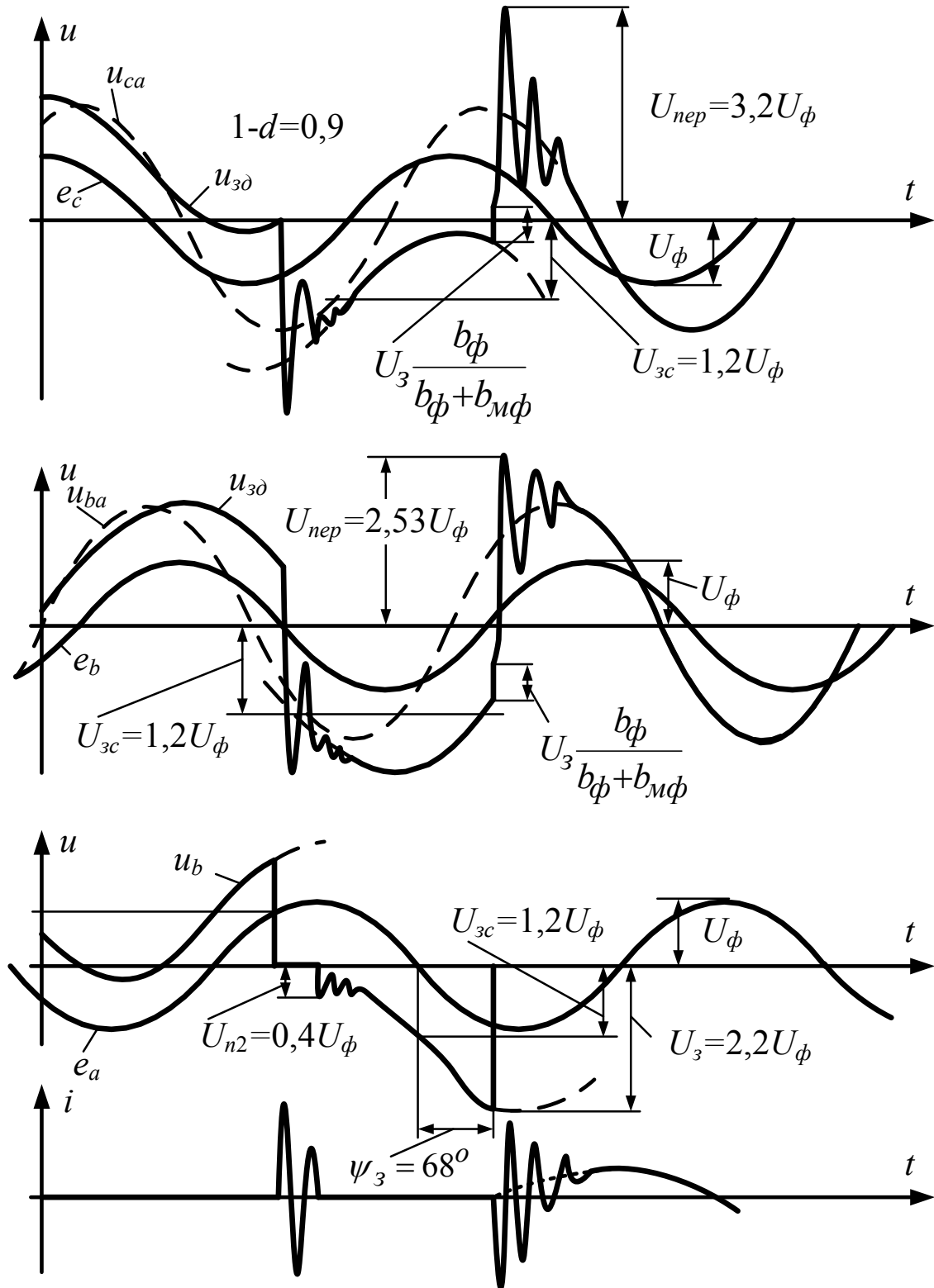


Рисунок 6.4 – Осцилограми розвитку перенапруг в трифазній мережі з ізольованою нейтраллю

### 6.3 Перенапруги при перемиженому 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.

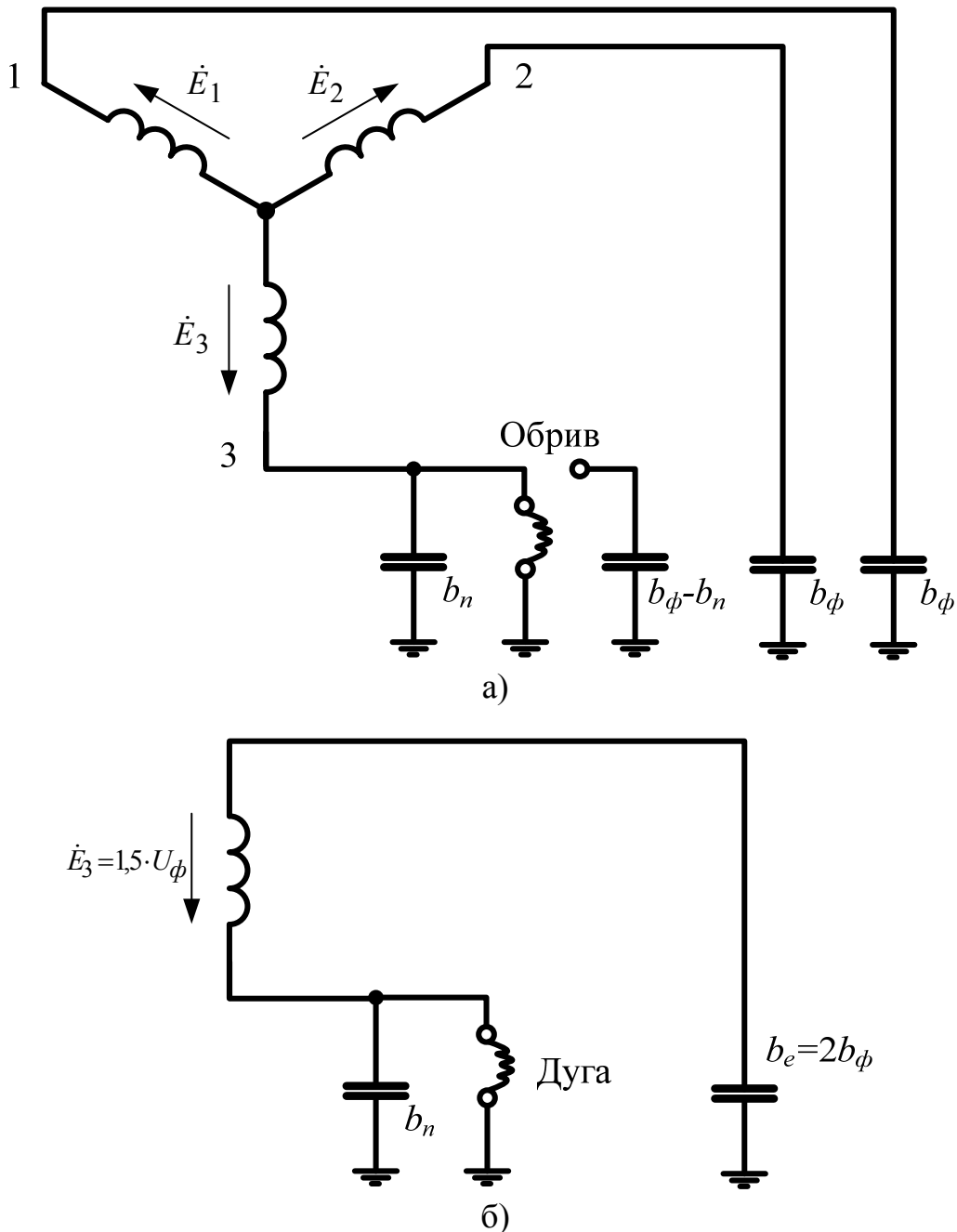


Рисунок 6.5 – Замикання на землю з обривом частини ємності пошкодженої фази:  
а – трифазна схема; б – розрахункова однофазна схема

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:

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

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)  $U_{зм} = 1,5 \cdot U_\phi + \frac{U_{n.з.}}{2}$ . На рис. 6.6 побудовані в залежності максимальних перенапруг від відношення  $b_n/b_\phi$ . Криві розраховані для трифазної мережі за формулами (6.2) і (6.3) за умови  $U_{n.з.} = 0,4 \cdot U_\phi$ . Як видно з кривих, при малому  $b_n/b_\phi$ , тобто при від'єднанні більшої частини ємності ушкодженої фази, можливі небезпечні для ізоляції перенапруги.

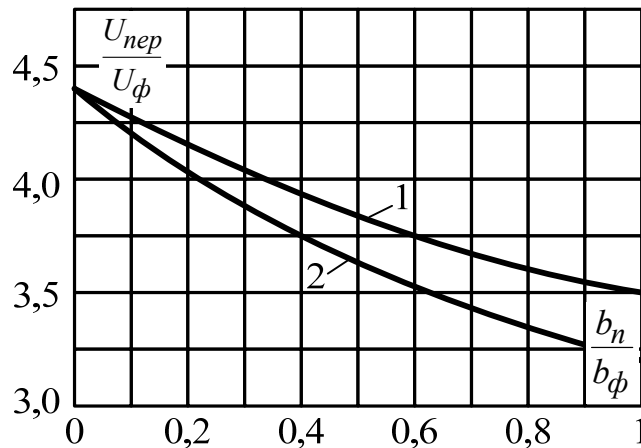


Рисунок 6.6 – Залежності перенапруг від відношення  $b_n/b_\phi$ :

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

2 – за міжфазної ємності  $b_{м\phi} = 1/3 \cdot b_\phi$

## 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  $U_{3c}$ . Як і у випадку з ізолюваною нейтраллю, перехід напруги на uszkodженій фазі від нульового значення до  $U_{\phi} + U_{3c}$  відбувається шляхом коливання з високою частотою  $\omega_0 \gg 1$  (рис. 6.7).

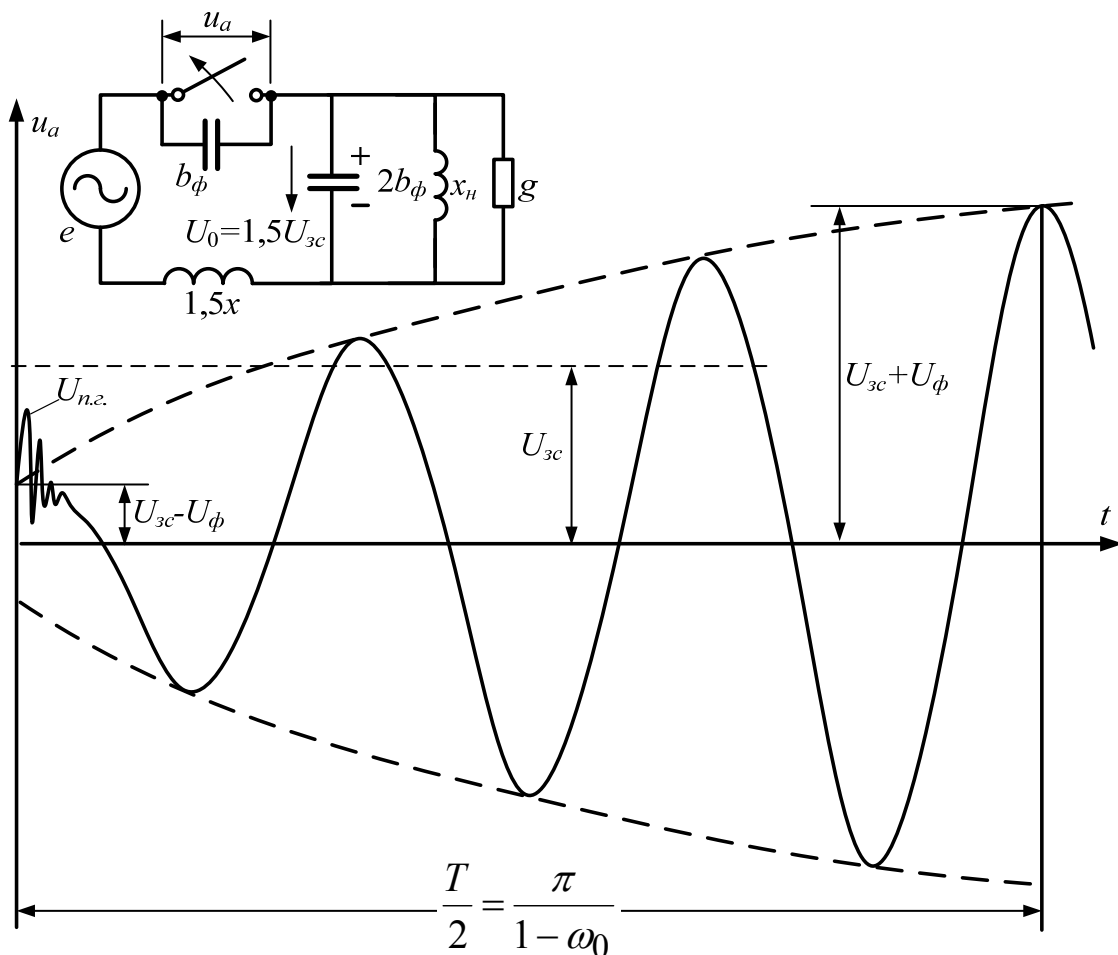


Рисунок 6.7 – Відновлення напруги на uszkodженій фазі при гасінні дуги в мережі з дугогасильною котушкою

Одночасно в контурі розвиваються коливання з низькою частотою

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

де  $x_k$  – індуктивний опір дугогасильної котушки.

Частота  $\omega_0$  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  $U_\phi + U_{zc} \cdot e^{-\delta \frac{T}{2}}$  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

$$u_n = U_\phi \sin(\tau + \psi) + U_{zc} \cdot e^{-\delta \frac{T}{2}}. \quad (6.4)$$

З цього співвідношення видно, що можливі перенапруги тим нижчі, чим більше  $\delta \frac{T}{2}$  – тобто, при заданому  $\delta$  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  $u_{пер}$ .

## ЛІТЕРАТУРА

1. Анализ надежности грозозащиты подстанций / [Костенко М. В., Ефимов Б. В., Зархи И. М. и др.]. – Л. : Наука, 1981 – 128 с.
2. Базелян Э. М. Физические и инженерные основы молниезащиты / Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В. И. – Л. : Гидрометеоздат, 1976. – 223 с.
3. 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.
4. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ / [Гиндуллин Ф. А., Гольдштейн В. Г., Дульзон А. А., Халилов Ф. Х.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
5. Грозозащита линий высокого напряжения переменного тока / [Костенко М. В., Богатенков И. М., Михайлов Ю. А. и др.]. - К. : ВИНТИ, 1984. Т. 12. – 112 с. - (Итоги науки и техники. Сер. Электрические станции и сети.)
6. Зархи И. М. Внутренние перенапряжения в сетях 6–35 кВ / Зархи И. М., Мешков В. Н., Халилов Ф. Х. – Л. : Наука, 1986.– 128 с.
7. 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.)
8. 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.
9. Степанчук К. Ф. Техника высоких напряжений / Степанчук К. Ф., Тиняков Н. А. – Минск : Вышэйша школа, 1982. – 367 с.
10. 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.
11. 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))
12. 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.



## Словник найбільш вживаних термінів

автоматичне повторне ввімкнення	autoreclosing
блискавка	lightning; bolt
блискавковідвід	lightning arrester; lightning discharger; lightning conductor
блискавкозахисне заземлення	lightning protection earth
вимикач	circuit breaker
внутрішні перенапруги	switching surge voltage; switching overvoltage; switching surge
вольт-секундна характеристика	volt-second characteristic
гірлянда ізоляторів	insulating string; catenary
генератор	generator
грозові перенапруги	lightning surge, lightning overvoltage
дугове замикання	arc-over
електрична енергія	electric energy
електрична міцність	dielectric strength
електрична схема	electric circuit
електричний апарат	electric apparatus
електродвигун	electric motor
електрорушійна сила	electromotive force
електроустаткування	electrical equipment
енергосистема	power supply system
ізоляція обмотки	primary insulation
іонізація	deionization
кабельна вставка	cable insertion
коливальний контур	oscillating circuit; oscillating loop
коротке замикання	short circuit
кратність перенапруг	overvoltage response ratio
лінія електропередачі	overhead line
метод симетричних складових	method of symmetrical components
напруга	voltage

номінальна напруга	nominal voltage, rated voltage
напруга змінна	ac voltage; alternating voltage
напруга постійна	dc voltage; direct voltage
напруга пробивна	punch-through voltage; disruption voltage
нульова послідовність	null sequence
обмежувач перенапруг нелінійний	overvoltage limiter
перекриття ізоляції	flashover
перенапруга	overvoltage; over-voltage
перехідний процес	transient process
потужність	capacity, power
пряма послідовність	forward sequence
реактор	reactor
резонанс	resonance
роз'єднувач	disconnecter
розрядник	aerial fuse, discharge switch
струм змінний	alternating current
струм короткого замикання	short-circuit current
струм постійний	direct current
струмоведуча частина	live part
схема заміщення	equivalent circuit; substitution circuit
трансформатор	transformer
ударний коефіцієнт	collisional coefficient
фронт хвилі	wave front; shock front
хвилі, що набігають	incoming wave; arriving wave
холостий хід	tickover; idling
частота	frequency; rate
швидкість обертання	rotation(al) rate

*Навчальне видання*

**Собчук Валерій Степанович  
Собчук Наталя Валеріївна  
Бурикін Олександр Борисович**

## **ПЕРЕНАПРУГИ І БЛИСКАВКОЗАХИСТ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено О. Бурикіним

Підписано до друку  
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.  
Тираж прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,  
навчально-методичний відділ ВНТУ.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, к. 2201.  
Тел. (0432) 59-87-36.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-87-38.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.