

А.М. Корольов
Ю.В. Степаненко

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ



А.М. Корольов
Ю.В. Степаненко

Техніка високих напруг

Навчальний посібник



До 100 річчя кафедри електроенергетики

Дніпро
НТУ ДП
2021

УДК 621.3.027.3 (075.8)

Рекомендовано методичною радою спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” (протокол № від 2021 року).

Корольов А.М., Степаненко Ю.В.

Техніка високих напруг: Навчальний посібник [Електронне видання]. – Дніпро.: Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, кафедра електроенергетики, 2021. – 134 с.

Викладені питання, пов’язані з високими напругами у електричних системах.

Розглянуті фізика та теорія розряду у газах, рідких, твердих і комбінованих діелектриках; хвильові процеси у лініях; характеристики зовнішньої та внутрішньої ізоляції електроустановок; грозові перенапруги та захист від них; координація та випробування ізоляції електрообладнання; внутрішні перенапруги.

Для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”.

Бібліогр.: 34 назв.

В оформленні посібника приймав участь к.т.н., ас. Прокуда В.М.

© А.М. Корольов, Ю.В. Степаненко, 2021

© НТУ “Дніпровська політехніка”, 2021

Вступ

Розвиток енергетики випереджає розвиток інших галузей промисловості та слугує показником загального росту індустріальної могутності країни. У той же час на потреби енергетики витрачається значна частина матеріальних і трудових ресурсів. Достатньо сказати, що в сучасному світі високорозвинених країн понад 40 % всіх витрат доводиться на процеси, пов'язані з виробництвом, розподілом і споживанням енергії. Ось чому енергетична криза середини 70-х років минулого сторіччя зробила також глибокий вплив на економіку і політику всіх країн.

Зі зростанням виробництва електроенергії зростають потоки потужності в електричних мережах і відстані, на які ці потужності передаються. У розвитку енергетики важливе місце займає використання високих напруг для передачі енергії на великі відстані. На початку 20-х років минулого сторіччя у СРСР була тільки одна ЛЕП-66, у 1932 році побудований Дніпрогес і запроваджена система 154 кВ, у середині 50-х років з впровадженням Куйбишевської ГЕС почалося застосування напруги 400 кВ. Починаючи з 60-х років споруджується велика кількість ліній електропередач 500 кВ і ця мережа стає кістяком єдиної енергетичної системи СРСР. Але напруга 500 кВ виявляється недостатнім для передачі величезних потоків енергії і в 70-х роках починається експлуатація ліній електропередач 750 кВ, що дозволяє передати потужність до 1,5 млн. кВт на відстані 1000 км. У цей час ведуться розробки електропередач 1150 кВ змінного струму та ± 750 кВ (1500 кВ) постійного струму.

Зі зростанням величини робочої напруги все більшу частку у вартості електроустаткування становить ізоляція. Надійна робота електроенергетичних установок високої напруги (ВН) в основному залежить від якості ізоляційних конструкцій та від досконалості тих заходів, які обмежують амплітуди різних напруг і перенапруг, що впливають на ізоляцію.

У теперішній час електроустаткування по ізоляції підрозділяється на класи напруги або класи ізоляції. Вони збігаються зі шкалою номінальних напруг електроустановок. Цілком очевидно, що в процесі експлуатації напруги в системі можуть трохи відрізнятись від номінальних. Таким чином, необхідно мати деякий запас електричної міцності ізоляції.

Наразі для кожного класу ізоляції встановлена найбільша робоча напруга електроустаткування – граничне значення напруги, необмежено тривалий вплив якого є припустимим.

Стандарт передбачає наступні класи і найбільшу робочу напругу.

Клас напруги, номінальна напруга, кВ	3	6	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150
Найбільша робоча напруга, кВ	1,15 U_n							1,1 U_n		1,05 U_n		
	3,5	6,9	11,5	23	40,5	126	172	252	363	525	787,5	1200

Однак вимоги до ізоляції визначаються не тільки робочою напругою, у процесі експлуатації в електроустановках короткочасно виникають значні підвищення напруги – так звані *перенапруги*.

Перенапруги можуть бути поділені на дві групи.

Внутрішні (комутаційні перенапруги) виникають в установках при оперативних перемиканнях електричних кіл (при роботі вимикачів, короткозамикачів, запобіжників, при дугових коротких замиканнях і т.д.) Вони можуть в 2...3,5 рази перевищувати фазну напругу установки. Як правило, ізоляція електроустановок до 220 кВ включно ці перенапруги витримує. При більш високих напругах економічно доцільно застосовувати різні способи обмеження перенапруг.

Зовнішні (атмосферні) перенапруги виникають при ударі блискавки в електроустановку або поблизу. Атмосферні перенапруги виникають порівняно часто і можуть досягати, при відсутності спеціальних захисних заходів, декількох мільйонів вольт, викликаючи ушкодження ізоляції електроустановок будь-якої номінальної напруги. Так, наприклад, напруга, що перевищує 1000 кВ з'являється на ізоляції приблизно в 70 % всіх випадків удару блискавки у провід.

При виборі ізоляції доцільно йти не тільки шляхом створення запасу її електричної міцності, але й по лінії захисних заходів, які запобігають появі небезпечних для ізоляції хвиль перенапруг. З цієї причини ізоляцію вибирають певного рівня з урахуванням захисних заходів.

Комплексне вирішення питань узгодження характеристик захисних пристроїв і характеристик ізоляції, яке забезпечує високу надійність роботи називається *координацією ізоляції*.

Таким чином завданням курсу є вивчення форм і величин перенапруг в електроустановках й способів їхнього обмеження до рівнів, при яких порушення ізоляції елементів електроустановок стає рідким явищем.

1 Розряди в газах

1.1 Види розрядів та іонізацій у газах

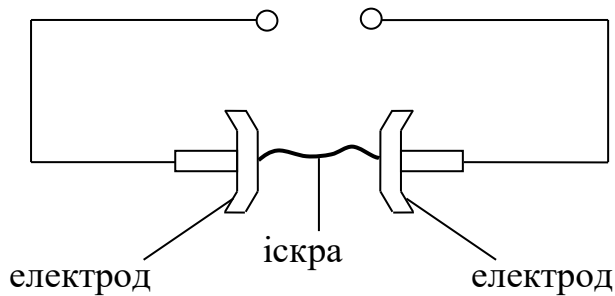
Повітря та інші гази у тій або іншій мірі присутні в будь-якій ізоляційній конструкції. Шини розподільних пристроїв, проводи ліній електропередач ізольовані один від одного повітрям. Опорні, підвісні ізолятори та інші ізоляційні конструкції перебувають у повітрі. У деяких типах високовольтних кабелів, конденсаторів, трансформаторів у якості ізоляції використовується газ під тиском. Газові включення є у твердій і рідкій ізоляції. Порушення електричної міцності ізоляційної конструкції може відбутися шляхом пробією твердого діелектрика або шляхом розвитку розряду в повітрі уздовж поверхні. З цієї причини електрична міцність повітря набуває принципово важливе значення для електричної міцності всієї установки.

Електричний розряд у газі являє собою проходження електричного струму крізь газове середовище під дією електричного поля.

Розрізняють наступні головні види електричних розрядів у газах: тихий, тліючий, іскровий, дуговий, коронний.

У промислових електроустановках високої напруги практично зустрічаються іскровий, коронний та дуговий розряди.

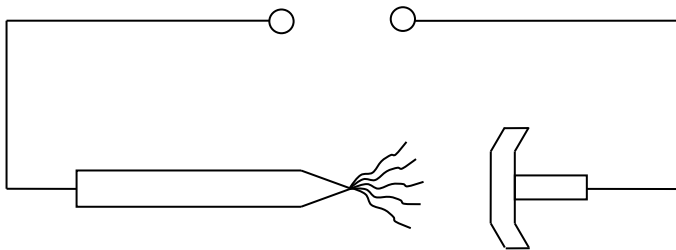
Іскровий розряд виникає при великих тисках газу (порядку атмосферного) та прикладанні до електродів високої напруги від малопотужного джерела. Розряд у цьому випадку не займає всього поперечного перерізу газового проміжку, а обмежується одним або декількома відносно вузькими каналами.



При невеликій потужності джерела живлення між електродами проскакує серія ниток, що світяться та відриваються, по зигзагоподібним сильно викривленим каналам.

Коронний розряд спостерігається в різко неоднорідних полях, коли один або обидва електроди мають малий радіус кривизни, в багато разів менший ніж відстань поміж електродами.

У цих випадках при тисках, близьких до атмосферного й досить високій напрузі безпосередньо з електрода з малим радіусом кривизни розвивається електричний розряд з характерним світінням.



Коронний розряд супроводжується протіканням слабкого струму. В міру збільшення напруги розряд розширюється, досягає протилежного електрода і надалі може перейти в іскровий або дуговий розряд.

Дуговий розряд є наступною стадією іскрового розряду при великій потужності джерела живлення. При дуговому розряді протікає великий струм, який сприяє розігріву каналу розряду, зростанню його провідності, отже, подальшому збільшенню струму. В остаточному підсумку встановлюється стан рівноваги, коли теплові втрати з каналу припинять подальше підвищення температури і розряд стабілізується. Для зовнішньої мережі цей процес аналогічний короткому замиканню поміж електродами.

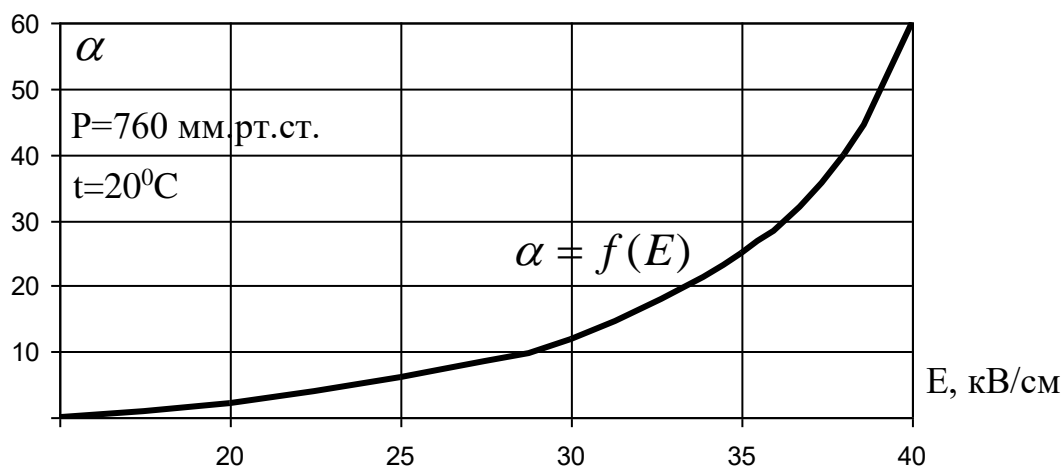
Процес переходу газу в якісно новий стан, при якому струм різко збільшується називають пробоєм газового проміжку. Іскровий або дуговий розряди настають наче раптово.

Різниця потенціалів на електродах поля за якої відбувається явище пробою називають розрядною або початковою напругою газового проміжку.

Явище розряду в газах тісно пов'язане з розвитком іонізаційних процесів. У теорії електричних розрядів розрізняють іонізацію об'ємну та поверхневу.

Об'ємна іонізація часток газу може бути викликана:

- 1) співударяннями електронів та іонів з нейтральними атомами і молекулами газу – ударна іонізація (коефіцієнт ударної іонізації залежить від виду газу, тиску та напруженості електричного поля);



коефіцієнт α дорівнює числу іонізацій, що здійснює один електрон на шляху в 1 см;

- 2) дією різноманітних променів, зокрема, променів, що утворюються при переході попередньо збуджених атомів і молекул у нейтральний (нормальний) стан – фотоіонізація;
- 3) співударяннями молекул газу одна з одною при високій температурі газу – термоіонізація.

Поверхнева іонізація здійснюється у вигляді електронної емісії з поверхні електродів. Енергію виходу електрони можуть набути:

- 1) за рахунок нагрівання металів – термоелектронна емісія;
- 2) за рахунок енергії електричного поля – електростатична або холодна емісія;
- 3) за рахунок променистої енергії – фотоелектронна емісія.

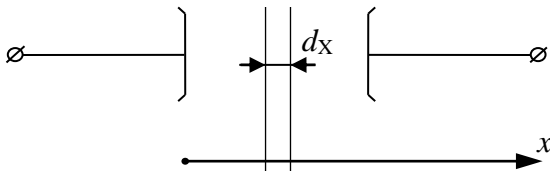
1.2 Лавина електронів

Розглянемо газовий проміжок поміж двома електронами і припустимо, що поблизу катода у цьому проміжку з'явився один вільний електрон під дією природних іонізаторів. Якщо напруженість поля досить завелика, то під час польоту до анода, електрон буде здійснювати ударну іонізацію при зіткненні з атомами та молекулами газу. Перше іонізуюче зіткнення призведе до утворення ще одного електрону, який також буде іонізувати. При наступному іонізуючому

зіткненні число електронів збільшиться до чотирьох, потім до восьми і далі в геометричній прогресії.

Такий потік електронів, що постійно підсилюється, одержав назву *лавини електронів*.

Електрони, що рухаються, залишають позаду позитивні іони, які через велику масу переміщуються до катоду з малою швидкістю.



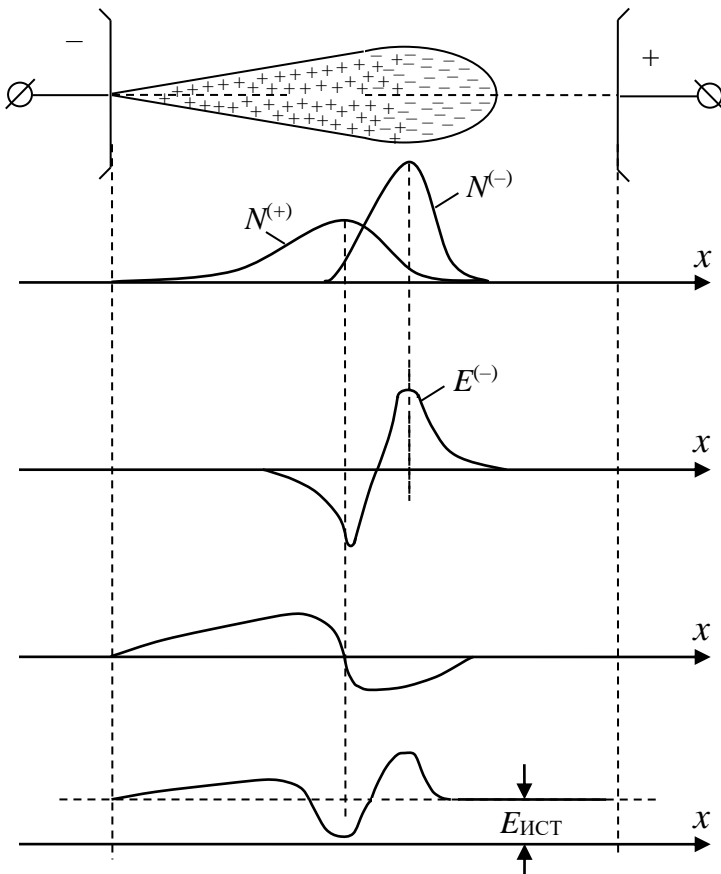
Припустимо, що число електронів на відстані x від катоду зросло від 1 до n . На шляху dx кожний з цих електронів здійснює $\alpha \cdot dx$ іонізацій, а всі електрони разом – $n \cdot \alpha \cdot dx$ іонізацій.

Отже, збільшення числа електронів на шляху dx буде дорівнювати:

$$dn = n \cdot \alpha \cdot dx \quad \text{или} \quad dn/n = \alpha \cdot dx$$

Інтегруючи по n від 1 до n , а по x від 0 до x , отримуємо

$$n = e^{\int_0^x \alpha dx}$$



лавина електронів у однорідному полі

щільність позитивного $N^{(+)}$ і негативного $N^{(-)}$ об'ємного заряду лавини

поздовжня складова напруженості поля від об'ємного негативного заряду лавини

поздовжня складова напруженості поля від об'ємного позитивного заряду лавини

результуюче поле у газовому проміжку з урахуванням впливу лавини

Для однорідного поля, у якому напруженість у всіх точках однакова, коефіцієнт ударної іонізації також постійний $\alpha = const$.

Число електронів у лавині однорідного поля

$$n = e^{\alpha x}$$

В міру просування лавини до аноду кількість електронів у голівці буде зростати, відповідно буде збільшуватися викривлення поля об'ємними зарядами лавини.

Характерним є різкий підйом напруженості поля перед лавиною і спад напруженості голівки. Також можна відзначити лавину фотонів великої енергії внаслідок рекомбінації іонів в області зниженої напруженості.

Виділення фотонів з енергією, яка дорівнює енергії іонізації газу, а також випромінювання, пов'язане зі збудженням і переходом молекул та іонів у нормальний стан, викликає іонізацію безпосередньо у газі, на поверхні катода або на поверхні порошин, що містяться в повітрі.

Випромінювання лавини стає усе більш інтенсивним, а викривлення поля відіграє істотну роль у подальшому розвитку розряду.

Таким чином, лавина рухається до анода. Вона припиняє своє існування тоді, коли всі позитивні іони дійдуть до катода.

1.3 Самостійний розряд

Розряди в газах зазвичай поділяють на несамостійні та самостійні.

Якщо електричний розряд обумовлений дією не тільки електричного поля, але й зовнішнього іонізатора, то такий розряд називають *несамостійним*. У цьому випадку усунення зовнішнього іонізатора негайно припиняє розряд (наприклад, у приладах, які вимірюють рівень радіації).

Самостійним називається такий розряд, який підтримується дією тільки електричного поля.

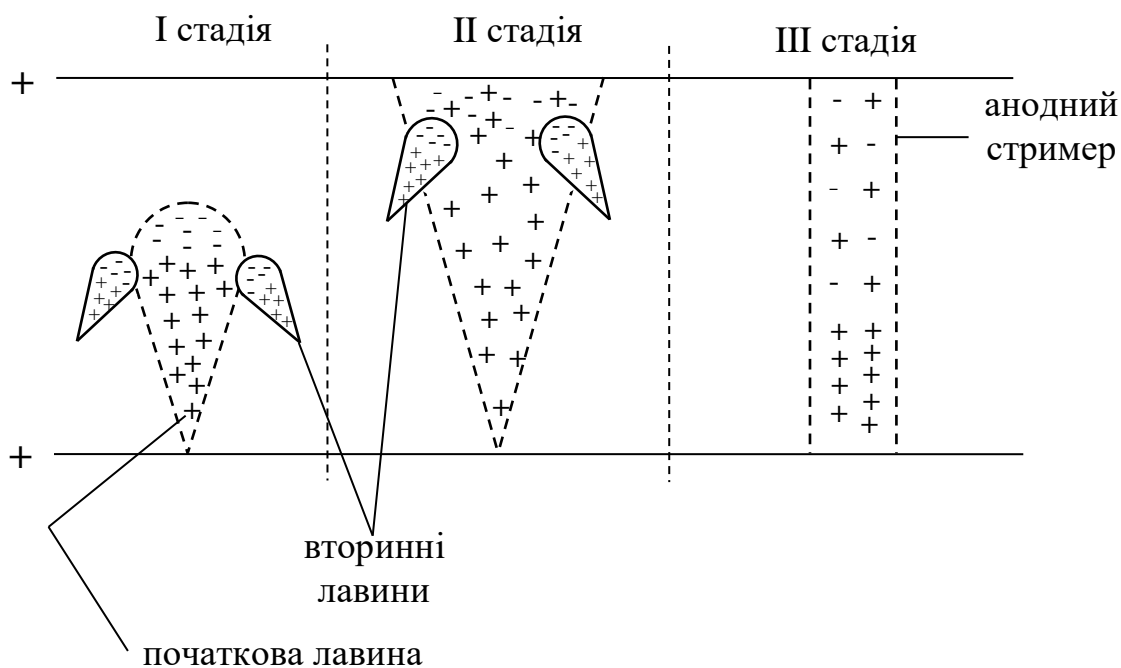
З розгляду лавинного розряду випливає, що для перетворення розряду в самостійний необхідно утворення нових вільних електронів (їх називають вторинними) за рахунок процесів, що відбуваються в самому проміжку ще до того, як перша лавина припинить своє існування. Розвиток першої лавини створює сприятливі умови для утворення вторинних електронів шляхом:

- бомбардування катода позитивними іонами першої лавини;
- фотоіонізації на катоді, що здійснюється випромінюванням початкової лавини;
- фотоіонізації в об'ємі газу за рахунок випромінювання початкової лавини.

При великих тисках газу в проміжку головну роль у формуванні розряду відіграє об'ємна фотоіонізація.

Якщо напруженість поля в газовому проміжку достатньо велика, об'ємний заряд лавини значний і створює істотне викривлення зовнішнього поля, то канал лавини починає випускати велику кількість фотонів ще до того, як позитивні іони початкової лавини підуть до катоду. Утворені цими фотонами вторинні електрони дадуть початок новим лавинам, електрони яких притягаються об'ємними позитивними зарядами голівки початкової лавини.

У просторі, заповненому об'ємними зарядами, середня напруженість невелика, тому значна кількість електронів, які проникли туди, перетворюється в негативні іони, а в місці розташування об'ємного заряду утворюється канал, заповнений плазмою – так званий *стример*.



Канал стримера є провідним, тому на його кінці утворюється підвищена напруженість поля.

Фотоіонізація, що триває, призводить до утворення нових лавин, які рухаються в напрямку найбільш сильного поля – до голівки стримера. Електрони цих лавин, ідуть до каналу стримера, а іони створюють поблизу його голівки позитивний заряд, який притягає подальші лавини.

Таким чином, канал стримера постійно подовжується, проростаючи до катоду, причому цей процес іде з постійно зростаючою швидкістю, оскільки в міру проростання стримера напруженість на його кінці збільшується.

Після перетинання стримером усього поміжелектродного простору, пробій можна вважати завершеним.

Для того, щоб в об'ємі виникла досить сильна фотоіонізація необхідний певний ступінь викривлення зовнішнього поля, тобто певна величина заряду початкової лавини. Умови пробою газового проміжку в однорідному полі можна записати:

$$\begin{aligned}(e^{\alpha S} - 1) \cdot \gamma &\geq 1 \\ e^{\alpha S} &= 1 + 1/\gamma \\ \alpha \cdot S &= \ln(1 + 1/\gamma) ,\end{aligned}$$

де γ – коефіцієнт вторинної іонізації, що дорівнює числу вторинних електронів, які утворюються початковою лавиною на один акт первинної іонізації (у початковій лавині).

Розвиток стримера з однієї лавини перешкоджає утворенню інших стримеров, і тим сильніше, чим далі він просунувся. З цієї причини весь проміжок перетинає завжди тільки один стример. Знижена напруженість поля поза стримером (ефект екранування) перешкоджає розвитку інших стримерів. Ця обставина і є поясненням того, що при високих тисках газу розряд розвивається у вигляді вузького каналу, який збігається з траєкторією розвитку одного зі стримерів.

1.4 Розряд у однорідному полі. Закон Пашена

Для визначення розрядної напруги використаємо отриману раніше умову самостійності розряду

$$\alpha \cdot S = \ln(1 + 1/\gamma)$$

Для атмосферного та більш високих тисків умова самостійності виконується, якщо електрон на шляху поміж електродами здійснює 20 іонізацій, тобто

$$\alpha \cdot S = \ln(1 + 1/\gamma) = 20$$

У рівномірному полі напруженість

$$E = U / S \quad \alpha = A \cdot p \cdot e^{-B \cdot p / E} ,$$

тобто

$$e^{-\frac{B \cdot p \cdot S}{U}} = \frac{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}{A \cdot p \cdot S} ,$$

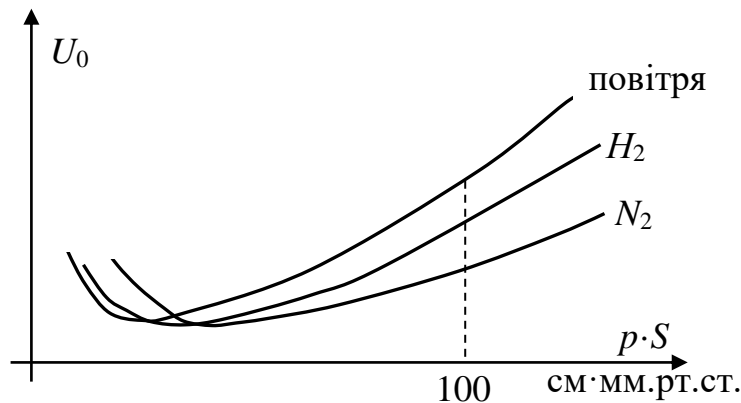
звідки знаходимо

$$U_0 = \frac{B \cdot p \cdot S}{\ln\left(\frac{A \cdot p \cdot S}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)}$$

Слід зазначити, що тиск (p) і відстань (S) входять у цей вираз тільки у вигляді добутків $p \cdot S$. Ця обставина є математичним виразом експериментального закону Пашена, який свідчить:

При незмінній температурі розрядна напруга газового проміжку в однорідному полі є функцією добутку тиску газу на відстань поміж електродами.

$$U_0 = f(p \cdot S)$$



При зменшенні $p \cdot S$ розрядна напруга спочатку зменшується, проходить крізь мінімум, а потім знову зростає. Залежність $U_0 = f(p \cdot S)$ дозволяє встановити шляхи підвищення розрядної напруги – збільшення відстані поміж електродами або підвищення тиску газу. У практичних конструкціях використовуються обидва шляхи.

Наявність мінімуму пробивної напруги пояснюється наступним:

При великих тисках число зіткнень електронів з атомами газу велике, а вільний пробіг електрона малий, мала енергія, яку він може отримати та передати при співударяннях. Тому для пробою потрібна висока напруженість поля.

При малих тисках, коли довжина вільного пробігу електронів стає сумірною з довжиною поміжелектродного проміжку, число зіткнень електронів з атомами стає настільки малим, що розвиток лавини під дією ударної іонізації утруднюється і для пробою знову потрібні високі напруги (ліва частина кривої).

Існує мінімальне значення напруги, нижче якого розряд у проміжках неможливий. При $\delta = 1$ цей мінімум дорівнює 270...300 В. Наявність такого мінімуму відіграє важливу роль у побудові іскрових проміжків розрядників.

Електрична міцність повітряного проміжку з однорідним полем може бути визначена за емпіричною формулою

$$U_0 = 6,4 \cdot \sqrt{\delta \cdot S} + 24,5 \cdot \delta \cdot S \quad \text{кВ} ,$$

де $\delta = \frac{0,386 \cdot p}{273 + t}$ – відносна щільність повітря; S – відстань у см.

Формула слушна для постійної напруги та напруги промислової частоти (по амплітуді).

Розрядна напруженість $E_0 = U_0 / S$ має в нормальних умовах величину порядку 30 кВ/см, але спадає зі збільшенням відстані S .

Це можна обґрунтувати наступним:

Оскільки для самостійного розряду необхідно виконати умову $\alpha \cdot S = 20$, то для великих S потрібні менші значення коефіцієнту α , він залежить від напруженості (показовий закон), тому при зменшенні E_0 змінюється (зменшується) незначно.

1.5 Розряд у слабо неоднорідному полі

Розрядна напруга в слабо неоднорідному полі й досі відповідає умові утворення стримеру. Але залежність тут більш складна.

До слабо неоднорідних належать поля в яких коефіцієнт неоднорідності $k \leq 2 \dots 4$ ($k = E_{\text{МАКС}} / E_{\text{СР}}$).

$$\int_1^2 \alpha \cdot dx \cong \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \cong 20$$

Інтегрування в цьому випадку повинно вестися по найбільш короткій силовій лінії 1-2.

Закон Пашена. У слабо неоднорідному полі розрядна напруга є функцією добутку тиску газу (або відносної щільності повітря) на відстань між електродами, та відношення до відстані усіх інших визначальних геометричних розмірів проміжку.

Наслідок. У геометрично подібних проміжках розрядна напруга є функцією тільки добутку $\delta \cdot S$. Закон Пашена для циліндричного конденсатора

$$U_0 = f(\delta \cdot S; R/S; r/S)$$

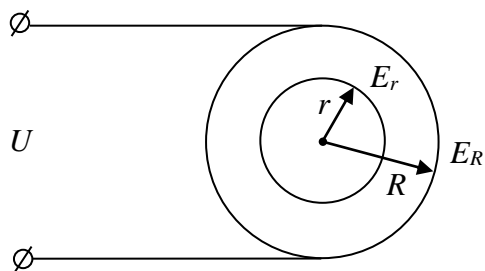
1.6 Розряд у різко неоднорідному полі

У більшості практичних конструкцій електричні поля є неоднорідними, тобто напруженість поля неоднакова в різних точках проміжку.

Ступінь неоднорідності поля характеризується відношенням максимальної напруженості $E_{\text{МАКС}}$ до середньої $E_{\text{СР}} = U / S$.

Для однорідного поля коефіцієнт неоднорідності $k = E_{\text{МАКС}} / E_{\text{СР}}$ дорівнює одиниці, а в неоднорідних полях він збільшується зі зростанням відстані між електродами і зменшенням радіусу кривизни електродів. У неоднорідних полях коефіцієнт ударної іонізації α не постійний, що обумовлює іншу картину розвитку електричного розряду.

У якості неоднорідного, розглянемо поле циліндричного конденсатора. Цілком очевидно, що при $R \gg r$, напруженості по поверхні внутрішнього й зовнішнього циліндрів різні.



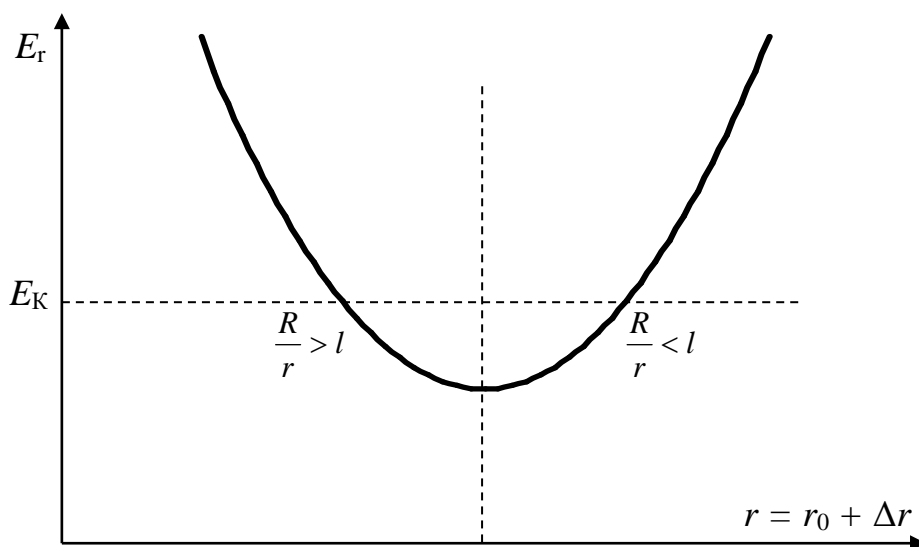
$$E_r \gg E_R$$

Звідси випливає, що область іонізації газу може існувати не в повному обсязі, а тільки на поверхні одного з електродів – внутрішнього циліндра.

$$E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}}$$

Таку форму електричного розряду, при якому процеси іонізації протікають в обмеженій частині проміжку, називають *коронною*.

Для виникнення корони потрібен певний ступінь неоднорідності поля. Оцінимо його на прикладі циліндричного конденсатора. Для спрощення розрахунків припустимо, що коронний шар завтовшки Δr є ідеальним провідником. Побудуємо залежність максимальної напруженості поля конденсатора від величини його радіуса r при незмінній напрузі U і незмінному радіусі зовнішнього циліндра R .



Вважаємо коронуючий шар завтовшки Δr ідеальним провідником, тоді поява коронуючого шару рівносильно зміні радіуса внутрішнього циліндра від початкової величини r_0 до значення $r = r_0 + \Delta r$.

Напруженість на поверхні коронуємого шару E_r може бути, у свою чергу визначена як напруженість на поверхні внутрішнього циліндра радіусом r .

Аналіз кривої $E_r = f(r)$ показує що при великій неоднорідності поля, тобто при $R / r > l$ подальше збільшення радіуса внутрішнього циліндра (за рахунок корони) веде до зниження напруженості поля на поверхні корони. Ця

напруженість може знизитися до такого значення, при якому зростання корони припиниться ($E_r = E_K$), тобто коронний розряд прийме стійку форму.

Стійка корона, таким чином, може мати місце тільки поблизу поверхні внутрішнього циліндра при співвідношенні радіусів циліндрів $R / r > l$ (ліва частина кривої).

Якщо ж $R / r < l$ (права частина кривої) то збільшення радіуса внутрішнього циліндра (за рахунок корони) викличе подальше збільшення максимальної напруженості (на поверхні коронуючого шару) і коронний розряд буде тривати довше, захоплюючи весь простір аж до зовнішнього циліндру, після чого виникає іскровий або дуговий пробій проміжку.

Таким чином, корона тим стійкіше, чим більше неоднорідність поля.

Коронний розряд при детальному розгляді являє собою сукупність стримерів – окремих схожих на іскру пагонів, що розвиваються з поверхні малого циліндра і не досягають великого.

Стример, як позитивний так і негативний, існує доти, поки в ньому підтримується потік електронів, тобто струм.



Амплітуда струму в стримері досягає 10 А.

Виникає питання – як замикається коло струму стримера, якщо газовий проміжок не втратив

своєї електричної міцності (не пробився).

Кінець стримера пов'язаний із протилежним електродом деякою ємністю C_c . Якщо прийняти, що напруга між голівкою стримера та протилежним електродом незмінна, то струм зсуву дорівнює

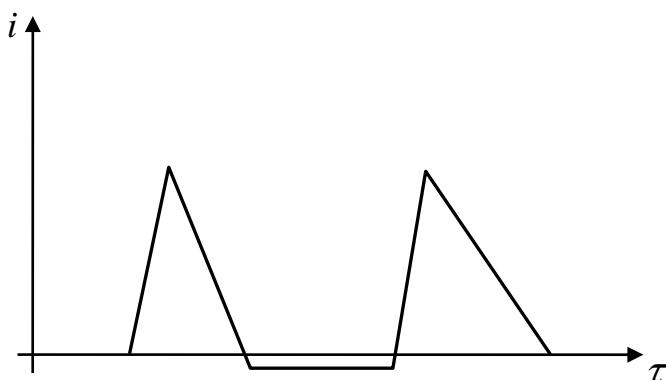
$$i = \frac{d}{dt}(uC_c) = u \frac{dC_c}{dt}$$

Великому значенню струму відповідає велике значення dC_c / dt , забезпечуване високою швидкістю просування каналу стримера.

Таким чином, стример може існувати тільки в розвитку.

Отже, кожен стример коронного розряду після свого повного розвитку повинен згаснути, тобто струм буде мати імпульсивний характер.

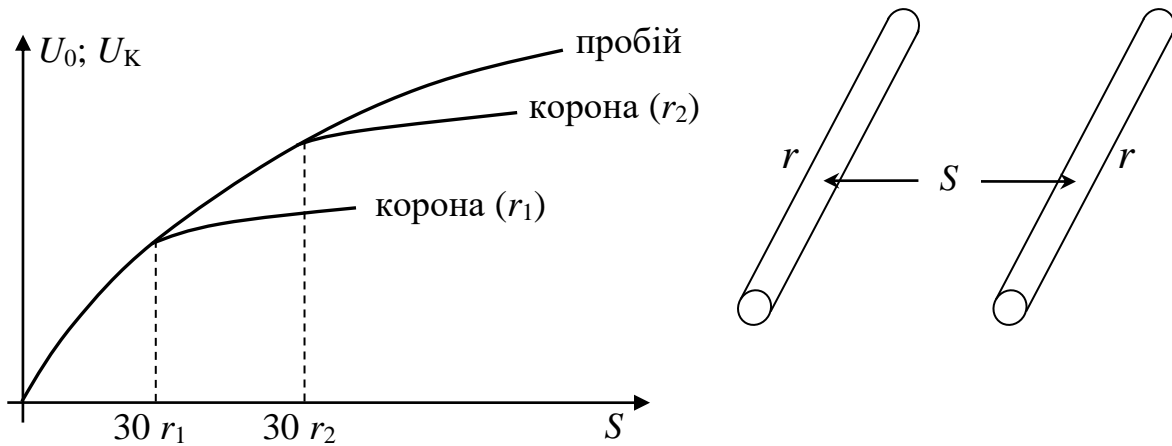
Подібна картина процесу розвитку розряду буде і при інших електродах, що створюють неоднорідне електричне поле.



Крива струму корони

Так, наприклад, при паралельних проводах з радіусом r пробій без корони спостерігається при відстані між ними до $30 r$.

При більших відстанях з'являється стійка корона, й тільки подальше збільшення напруги викликає перехід корони в іскрове перекриття.



Напруга виникнення видимої корони поміж проводами

$$U_{K.AMPL} = 30 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r} \text{ , кВ}$$

Напруга пробою

$$U_{0.AMPL} = 30 \cdot \delta \cdot m_2 \cdot \left(1 + \frac{0,01}{\sqrt{r \cdot \delta}} \cdot \frac{S}{r} \right) \cdot r \cdot \ln \frac{S}{r} \text{ , кВ}$$

де m_1 – коефіцієнт гладкості проводів (0,82...0,9); m_2 – коефіцієнт погоди.

Втрати на корону при змінній напрузі можна було б визначати за залежністю сумарного заряду проводу від напруги (вольт-кулонова характеристика).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T} \oint u \cdot dq$$

Проте, сильна залежність втрат від умов погоди змушує користуватися експериментальними залежностями.

$$U_{K.ЭФФ} = 21,2 \cdot \delta \cdot r \cdot \ln(S/r) m_1 \cdot m_2 \text{ ,}$$

приймавши $m_1 \cdot m_2 = 0,8$, $\delta = 1,0$, $\ln(S/r) = 6,5$ отримаємо вираз для мінімального діаметру проводу за умови відсутності втрат на корону

$$d_{MIN} = 1,15 \cdot U_H \cdot 10^{-2} \quad d_{MIN} = 0,115 \cdot U_H \text{ (см),}$$

що дає

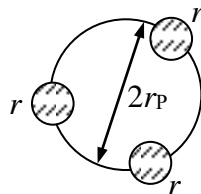
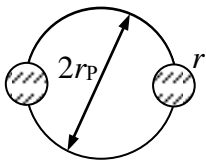
U_H , кВ	110	220	400
d_{MIN} , см	1,25	2,5	4,6

Проводи діаметром 4,6 мм промисловістю не випускаються (вони важкі та не відповідають пропускну́й потужності), тому для запобігання коронного розряду на ЛЕП застосовують розщеплені (розширені) і порожнисті проводи (до 60 мм).

За рахунок розщеплення проводів напруженість на їх поверхні зменшується на 10...20%, що підвищує напругу виникнення корони.

Зазвичай провід розщеплюють на 2, 3, 4 проводи (n – коефіцієнт розщеплення, відповідно дорівнює 2, 3, 4), які розміщують по колу радіусом r_p (радіус розщеплення). Такий провід веде себе щодо корони як суцільний провід радіусом $r_{\text{э}}$.

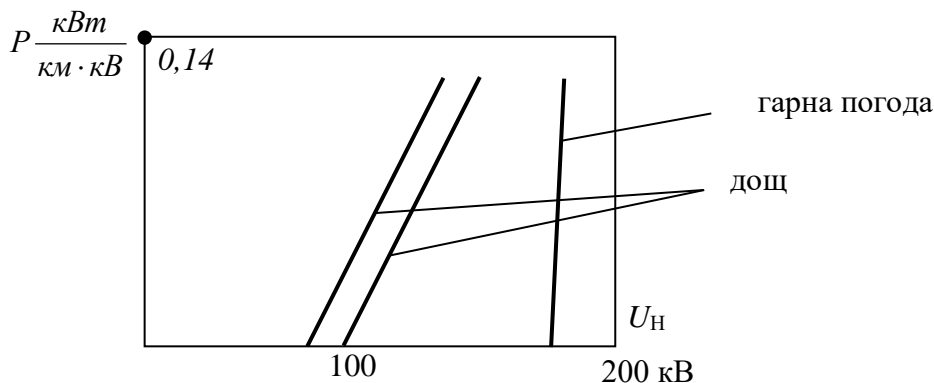
$$r_{\text{э}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_p^{n-1}}$$



Так, наприклад, провід перерізом $S = 240 \text{ мм}^2$ (діаметром 17 мм) розділяється на три $S = 80 \text{ мм}^2$ ($\text{Ø} 10 \text{ мм}$), які розміщуються по колу діаметром 20 см (радіус розміщення $r = 10 \text{ см}$). Цей провід щодо виникнення корони поводитья як суцільний діаметром 13,5 см.

$$r_{\text{э}} = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot r_p^{n-1}} = \sqrt[3]{3 \cdot 0,5 \cdot 10^2} = \sqrt[3]{150} = 5,4 \text{ , см} \quad \text{Ø} = 10,8 \text{ см}$$

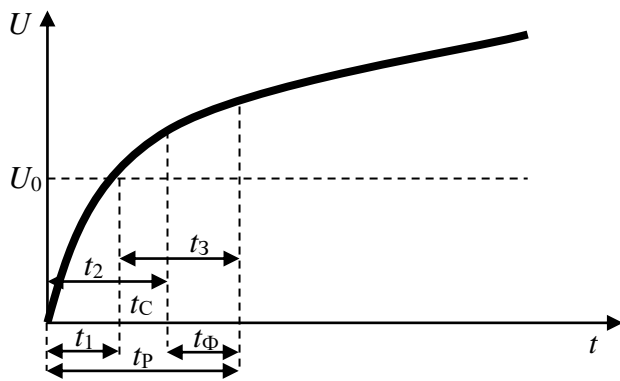
Втрати на корону дуже залежать від напруги ЛЕП і погодних умов.



1.7 Розряди в газах при імпульсних напругах

Імпульсами в техніці високих напруг називаються напруги або струми, що діють короткочасно (десятки мікросекунд).

Найнебезпечніші хвилі імпульсних напруг виникають в електричних установках при атмосферних перенапругах, викликаних розрядами блискавки.



При впливі на газовий проміжок хвилі напруги з амплітудою, що перевищує початкову напругу U_0 , процес розряду займає деякий проміжок часу – t_p .

По-перше, розряд не може відбутися раніше моменту t_1 ($U < U_0$).

По-друге, навіть у момент t_1 розряд не виникає одразу, тому що для цього потрібна наявність хоча б

одного ефективного електрону. Поява ефективного електрону залежить, в основному, від зовнішніх причин і носить статистичний характер.

Статистичний час запізнювання – t_c визначається прикладеною напругою, матеріалом електродів і зовнішнім іонізатором.

$t_c = 0,05$ мкс для алюмінієвого катоду, $t_c = 0,5$ мкс для мідного катоду.

Таким чином, розвиток розряду почнеться після закінчення часу

$$t_2 = t_1 + t_c.$$

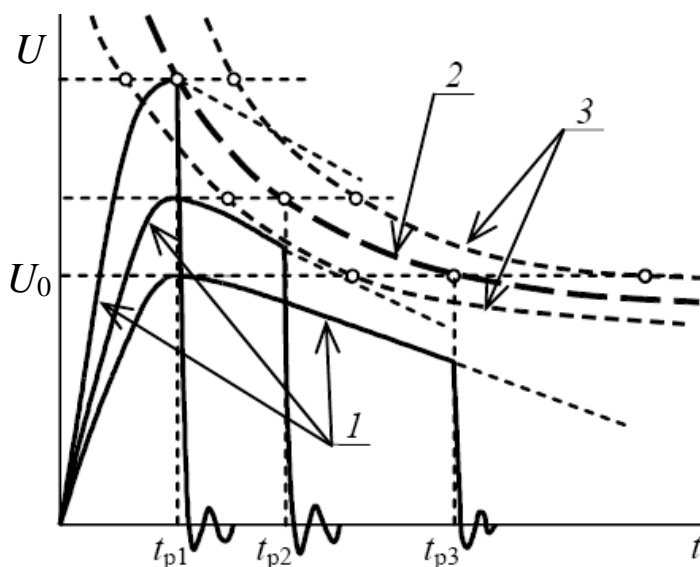
Отже, повний час розряду t_p складається із трьох доданків

$$t_p = t_1 + t_c + t_\phi,$$

де t_ϕ – тривалість формування розряду, причому сума $t_3 = t_c + t_\phi$ часто називається часом запізнювання розряду. Справа в тому, що не кожен вільний електрон стає початковим (частина потрапляє на катод, відразу зчіплюється з атомами кисню, утворюючи іони і т.д.).

Якщо напруга невелика ($U \approx U_0$), то час очікування ефективного електрона значний (десятки і навіть сотні мікросекунд).

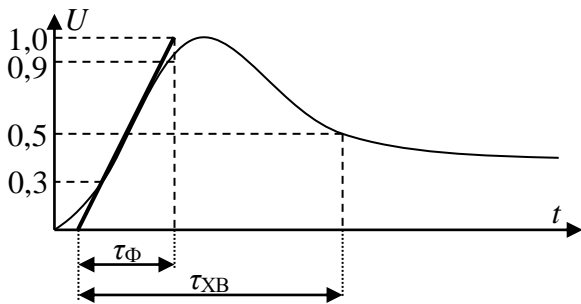
Оскільки обидві складові часу запізнювання (t_c и t_ϕ) у значному ступені залежать від прикладеної напруги, повний час розряду при різних значеннях напруги хвилі повинне бути різним.



Залежність часу розряду від амплітуди прикладеної напруги стандартної хвилі зветься *вольт-секундною характеристикою* проміжку.

- 1 – імпульси напруги
- 2 – крива середніх значень пробивної напруги
- 3 – межа розкиду пробивних напруг

У практичних цілях залежність часу розряду від напруги знімають при впливі так званих стандартних хвиль.



Параметри хвилі напруги або струму визначаються в такий спосіб. Ділянка кривої, де напруга змінюється від нуля до максимального значення, зветься *фронтом хвилі*.

Ділянка, де напруга спадає від максимуму до нуля – *хвіст хвилі*.

На практиці за довжину фронту приймають умовну величину, отриману при випрямленні фронту через точки 30 й 90 % максимуму.

Іншою характеристикою хвилі є її довжина $\tau_{ХВ}$ – час відлічений від початкової точки спрямованого фронту до моменту, коли напруга знизиться до 50 % свого максимального значення.

Для випробування ізоляції імпульсною напругою прийнята стандартна хвиля тривалістю 50 мкс з фронтом 1,2 мкс (1,2 / 50).

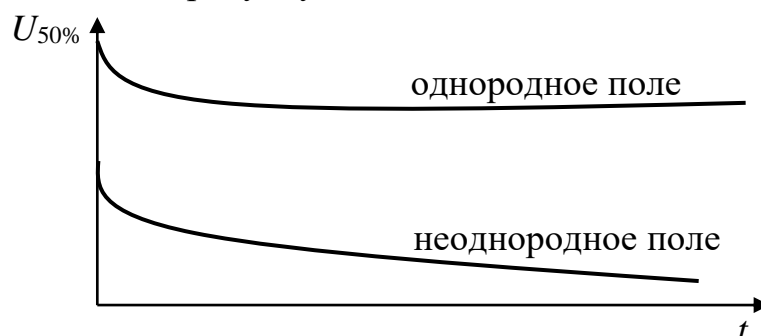
Крім того провадяться випробування так званою зрізаною (вкороченою) хвилею з часом зрізу 2...3 мкс.

Експериментальне визначення вольт-секундної характеристики є досить трудомісткою операцією, тому для практичних цілей імпульсну міцність ізоляції характеризують наступними параметрами:

1. $U_{50\%}$ – мінімальна імпульсна (або 50 %-ва) розрядна напруга – це амплітуда стандартної хвилі, при багаторазовому впливі якої, пробій ізоляції настає в 50 % всіх дослідів. Ця напруга відповідає часу 6...10 мкс (горизонтальна ділянка характеристики).
2. β – коефіцієнт імпульсу – це відношення 50 % розрядної напруги до статистичної розрядної напруги

$$\beta = U_{50\%} / U_0$$
3. Розрядна напруга при часі 2 мкс – це величина напруги вкороченої хвилі, що викликає пробій ізоляції (пробій відбувається на максимумі стандартної хвилі)

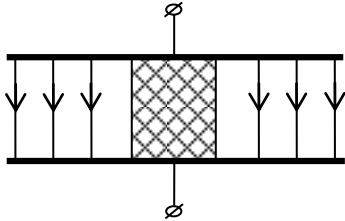
Час розряду в неоднорідних полях дуже залежить від напруги через зміну швидкості формування розряду. Приблизна форма вольт-секундних характеристик наведена на рисунку.



2 Електричні розряди на поверхні діелектрика

2.1 Діелектрик розташований в однорідному полі паралельно силовим лініям

Форма і розташування діелектрика в полі такі, що не міняють картину поля, тобто поле залишається однорідним.



Однак навіть у цьому випадку розрядна напруга газового проміжку істотно нижче розрядної напруги в чисто повітряному проміжку. Розряд відбувається уздовж поверхні твердого діелектрика.

Хоча таке розташування на практиці не має місця, цей випадок цікавий у теоретичному плані.

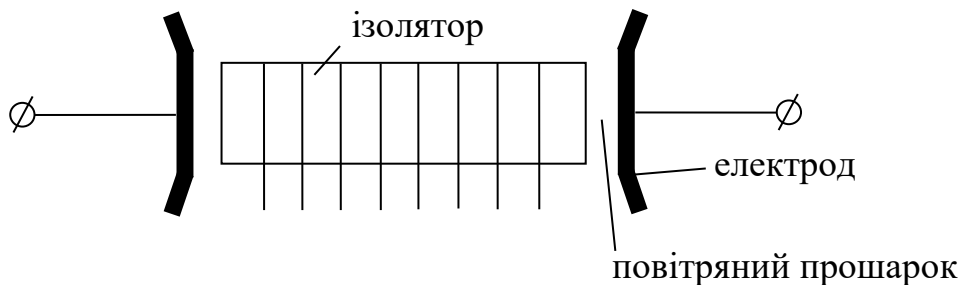
Експериментальні дослідження дають наступні значення розрядних напруг.



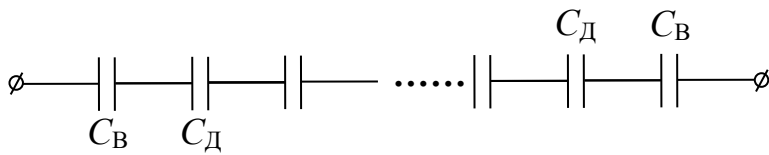
У розглянутому випадку зниження напруги викликаються наступними факторами:

а) нещільне прилягання електродів до діелектрика

Оскільки діелектрична проникність повітря приблизно в 4 рази менше ніж матеріал ізолятора.



На схемі заміщення ізоляційну конструкцію можна представити ланцюжком ємностей C_B – повітряного прошарку та C_D – такого ж за розміром ізолятора, причому $C_B \approx 1/4 \cdot C_D$. Прикладена напруга розподіляється по ланцюжку $C_B - C_D \dots C_D - C_B$ таким чином, що напруженість у повітряному



проміжку в 4 рази вище середньої (ніж на іншій частині ізоляційної конструкції). Додатково до цього діє фактор більш

низької електричної міцності повітряного проміжку. У останньому починається іонізація, продукти якої виносяться на поверхню твердого діелектрика, полегшуючи покриття всього ізолятора.

Для усунення цього неприємного явища, нещільності зашпаровуються цементом.

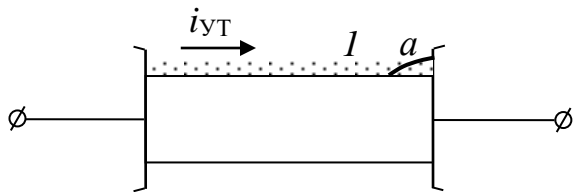
б) зволоження поверхні

Вода має іонну провідність і при впливі напруги в областях, прилеглих до електродів, накопичуються іони протилежної полярності, напруженість поля поблизу електродів збільшується, а іонізація та умови розряду полегшуються.

в) забруднення діелектрика

У реальних умовах ізолятор завжди покритий шаром пилу, який при зволоженні збільшує свою провідність.

Ці забруднення завжди нерівномірні. Ділянки з найбільшим опором швидко нагріваються струмом витoku і підсушуються аж до припиненні витoku.

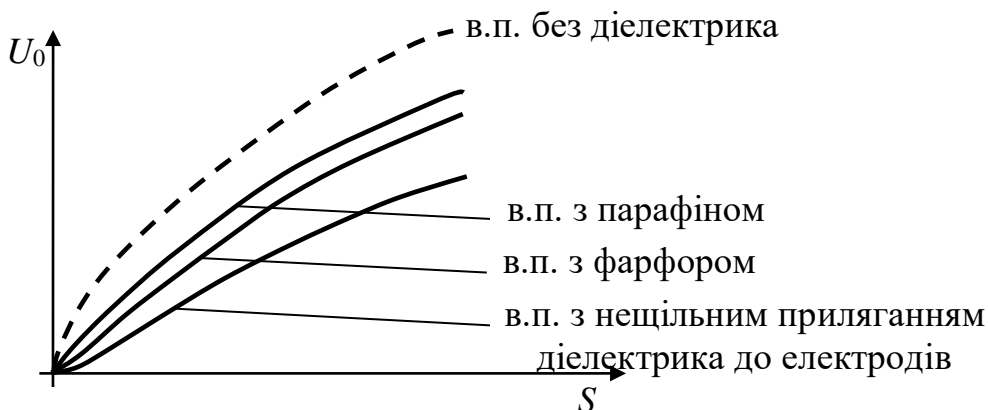


Підсушена ділянка має підвищену напруженість поля і може бути перекрита дугою «а». Струм витoku з появою дуги збільшується, відбувається нагрівання та підсушування наступної ділянки «l», дуга подовжується, а струм витoku знову може

збільшитися. Дуга може збільшуватися доти, поки не досягне протилежного електрода (відбудеться перекриття ізолятора по поверхні).

Однак процес може піти і таким чином, що через ефект підсушування всього шару пилу струм витoku зменшується настільки, що дуга «а» гасне не досягнувши протилежного електрода.

Тоді шар пилу знову зволожиться, збільшиться струм витoku, з'явиться часткова дуга «а» і т.д. У цьому випадку будуть мати місце окремі потрiскування, безпечні для ізоляції.

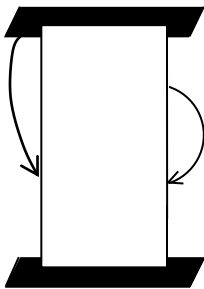


Вплив вологи особливо сильно проявляється в гідрофільних діелектриках (тих, що сильніше абсорбують вологу – фарфор, скло).

Приклад впливу різних факторів наведений на графіку.

2.2 Діелектрик у неоднорідному полі

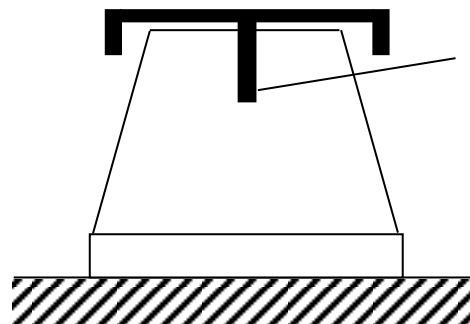
Силові лінії спрямовані так, що тангенціальна складова перевищує нормальну (опорний ізолятор).



Процеси, що мають місце в даному випадку, аналогічні раніше розглянутим, але їх вплив на розрядну напругу виражений менш сильно, оскільки зниження розрядної напруги пояснюється, в основному, появою неоднорідності поля, а в цьому випадку поле і так неоднорідне.

У неоднорідному полі розряд починається зазвичай з електрода, не з'єднаного із землею при його позитивній полярності.

Внутрішній екран збільшує ємність верхнього електрода та знижує тим самим напруженість поля (в області верхнього електрода.) Це зниження можна довести до такої стадії, що розряд почнеться на поверхні з нижнього електрода, оскільки максимальна напруженість буде вже в цій області.

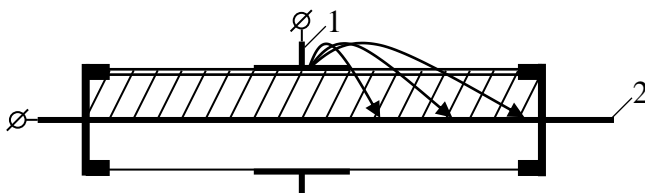


внутрішній екран

Оптимальні розміри екрана мають місце при рівності розрядних напруг при позитивній і негативній полярності прикладеної напруги.

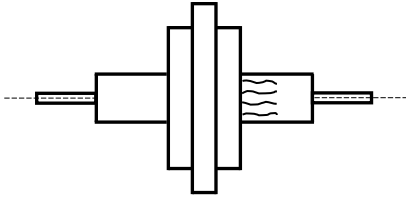
Різного типу ребра, екрани, бар'єри збільшують довжину шляху витоку та підвищують розрядну напругу.

2.3 Діелектрики в різко неоднорідному полі (переважає нормальна складова напруженості)



прохідний ізолятор

З огляду на нерівномірність розподілу напруги з одного з електродів починається розряд у вигляді корони. Висота світлого шару зростає в міру збільшення напруги, потім по поверхні твердого діелектрика починають поширюватися яскраві гіллясті пагони у вигляді іскор.



Напруга, що відповідає появі цих іскор при змінній напрузі залежить від поверхневої ємності діелектрика. Довжина іскор визначається ємністю діелектрика та прикладеною напругою.

Поверхнева ємність – ємність конденсатора, у якого однією обкладкою є поверхня по якій розвивається розряд, а іншою – протилежний електрод конструкції.

$$l = K \cdot C_0^2 \cdot U^5 \cdot \sqrt{\frac{dU}{dt}}$$

Перекриття ізолятора відбувається при $l = l_{\text{П}}$, звідки

$$U_P = K \cdot l_{\text{П}}^2 \cdot \left(\frac{d}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0} \right)^{0,4},$$

де d – товщина діелектрика; ε , ε_0 – діелектричні постійні.

З рівняння випливає, що збільшення довжини ізолятора мало впливає на розрядну напругу. Більшого ефекту можна досягти зменшенням питомої поверхневої ємності (збільшення діаметра ізолятора у фланця, нанесення напівпровідного покриття, що вирівнює напруженість поля, виконання ребер і т.д.).

При постійній напрузі поверхнева ємність практично не впливає на розвиток розряду і міцність ізолятора виявляється близькою до міцності чистого повітряного проміжку.

3 Розряди в рідкій, твердій і комбінованій ізоляції

3.1 Рідкі діелектрики

Електрична міцність ретельно очищених хімічно однорідних рідин може перевищувати 1 МВ/см. Пробій при цьому носить характер електронного і подібний до пробою газів.

Технічні рідини мають міцність 200...250 кВ/см. Це пояснюється, в основному, наявністю різних домішок (вода, газ).

Крапля води витягується в напрямку електричного поля і на кінцях цього еліпсоїда напруженість збільшується. Газ, якого у звичайних умовах є приблизно 100 мм на 1 л масла, виділяється під впливом поля у виді бульбашок. Причини цього до кінця не з'ясовані. Напруженість поля в бульбашці збільшена (діелектрична проникність менше ніж у маслі), відбувається іонізація повітряного включення (його електрична міцність нижче, ніж масла). Бульбашка витягується в напрямку електричного поля, являючи собою

провідне включення. З'являється неоднорідність поля (в маслі) за рахунок чого пробій проміжку полегшується.

У різко неоднорідних полях вплив домішок не настільки істотний, тому що від них уже залежить мало (поле й так неоднорідно). Міцність рідкої ізоляції різко збільшується при імпульсних напругах. У неоднорідному полі коефіцієнт $\beta = 1,4 \dots 1,5$, в однорідному – $1,5 \dots 3$.

Справа в тому, що при малих часах мала ймовірність утворення слабкої ланки, за якою розвивається розряд.

У рідких діелектриках розрізняють наступні види провідності:

- електронна – як наслідок іонізаційних процесів (аналогічно газовому проміжку);
- іонна, що залежить також від напруженості поля – забезпечується за рахунок дисоціації молекул рідини;
- катафоретична – забезпечується переміщенням заряджених часток домішок (наприклад, колоїдних).

Іонна та катафоретична визначають діелектричні втрати в рідинах.

Необхідно мати на увазі ту обставину, що в кінцевій стадії пробій рідини завжди проходить по газовому каналу.

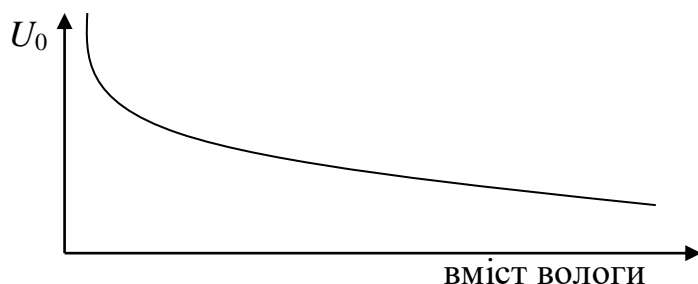
Тверді частинки і волокна утворюють містки, по яких може статися поверхневий розряд.

Об'єднання частинок і волокон у містки спостерігається в неоднорідних полях, коли діелектричні проникності масла і твердого включення не рівні між собою.

У цьому випадку частинки, поляризуючись в електричному полі, утворюють диполі, орієнтовані уздовж силових ліній поля. На заряди диполя $q_1 = q_2$ діють протилежно спрямовані сили $E_1 \cdot q_1$ та $E_2 \cdot q_2$, де E_1 і E_2 напруженості в точках розташування зарядів диполя. Коли $E_1 \neq E_2$ (неоднорідне поле), рівнодіюча цих сил не дорівнює нулю.

Для твердих часток $\epsilon_T > \epsilon_M$ та рівнодіюча сил спрямована у бік більшої напруженості. Туди ж спрямовуються самі тверді частинки.

Окрім того, поблизу кожної частинки існує місцева неоднорідність поля. Тому вони прагнуть об'єднатися в ланцюжки, витягнуті уздовж силових ліній поля. За певних умов з ланцюжків утворюються містки, що перекривають весь розрядний проміжок або значну його частину. По містку відбувається пробій проміжку (по поверхні).



Найважливішою забруднюючою домішкою рідкого діелектрика є волага, але не вода справжнього молекулярного розчину, а вода емульгована з крапельок діаметром $0,01 \dots 0,1$ мкм.

Водяні краплі поводяться як тверді частинки, утворюючи ланцюжки, містки – найтонші водяні канали. Особливо сильний ефект волаги в маслі, забрудненому волокнами.

Напруга появи корони і розрядів, що ковзають, а також розрядна напруга в маслі істотно вище ніж у газах. Розвиток корони і тим більше розрядів, що ковзають по поверхні діелектрика в маслі неприпустимо, особливо для органічних матеріалів, які можуть швидко зруйнуватися внаслідок впливу на них підвищеної температури і хімічно активних речовин.

3.2 Пробій твердих діелектриків

Рух вільних електронів у твердому діелектрику має більш складний характер, ніж у газі та рідині. Тому математичний опис процесу розвитку пробою зустрічає великі труднощі, і в даний час теорія пробою твердих діелектриків відсутня. Пробій твердих діелектриків має кілька різновидів:

а) електронний пробій аналогічний пробою в газах. Пробій твердого діелектрика часто супроводжується механічним руйнуванням діелектрика.

Електрична міцність твердих діелектриків після пробою не відновлюється $E_{пр} = 1 \dots 10$ МВ/см.

Якщо до твердого діелектрика прикладаються короточасні імпульси порівняно невеликої амплітуди, то в ньому можуть виникати мікроскопічні тріщини. У деяких аморфних діелектриках, наприклад, у склі, каніфолі, целулоїді тріщини самозаплавляються і при повторних імпульсах кожен раз виникають на новому місці. Пробивна напруга таких діелектриків мало залежить від кількості прикладених імпульсів.

У більшості ж твердих діелектриків при повторних імпульсах розряд розвивається по шляху попереднього і мікротріщина збільшується. Тому з ростом кількості прикладених імпульсів пробивна напруга діелектрика зменшується. Це явище, що відбиває накопичення пошкоджень ізоляції, називається *кумулятивним ефектом*.

б) тепловий пробій

Будь-який діелектрик має поверхневу і об'ємну провідність. При розташуванні діелектрика в електричне поле в ньому виділяється енергія (мають місце втрати).

Питомі втрати збільшуються зі зростанням напруженості поля.

$$P = \omega \cdot \varepsilon \cdot E^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \text{ Вт/см}^3$$

і дуже сильно збільшується при нагріванні діелектрика.

$$P_T = P_{T_0} \cdot e^{\alpha \cdot (T - T_0)},$$

оскільки при нагріванні збільшується тангенс кута діелектричних втрат

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{\alpha \cdot (T - T_0)}$$

Ріст температури при нагріванні діелектрика супроводжується і посиленням тепловіддачі.

$$P_{отв} = S \cdot K \cdot (T - T_{окр})$$

У ряді випадків температура діелектрика перевищує допустиму і відбувається його тепловий пробій (пропал).

Тепловий пробій 1 роду має місце при відсутності теплової рівноваги – тобто коли швидкість нагрівання перевищує швидкість зростання тепловіддачі.

Тепловий пробій 2 роду можливий при відсутності необмеженого нагріву, якщо стала температура діелектрика досить велика (вище допустимої для даного типу ізоляції).

Руйнування відбувається внаслідок оплавлення, обвуглювання і тому подібних процесів, викликаних діелектричним нагріванням.

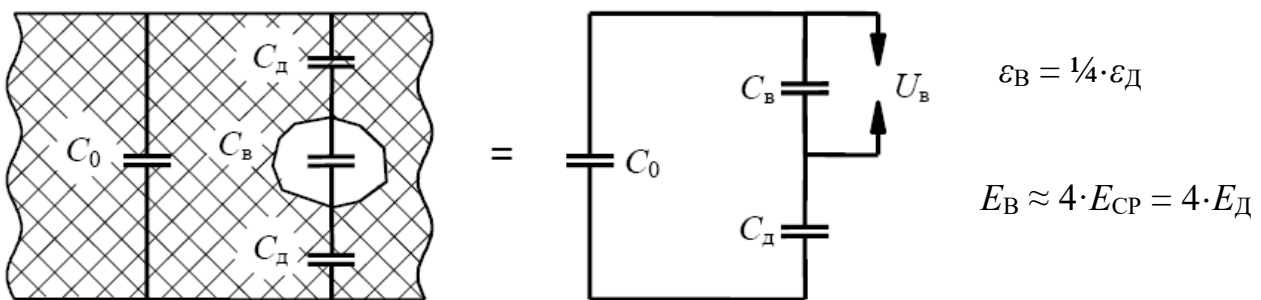
Величина $\text{tg}\delta_{20^\circ\text{C}}$ є електричною характеристикою, що визначає можливість матеріалу відносно теплового пробою.

При збільшенні $\text{tg}\delta$, наприклад, у процесі зволоження ізоляції, напруга теплового пробою знижується.

Особливо велика небезпека теплового пробою при високих частотах.

Час, за який розвивається тепловий пробій, вимірюється хвилинами.

в) електрохімічний (іонізаційний) пробій можливий у слабких місцях діелектрика (наприклад, газове включення).



- C_0 – ємність бездефектної ізоляції;
- C_v – ємність повітряного включення;
- C_d – ємність діелектрика послідовно з включенням;
- U_v – напруга пробою повітряного включення

Часткові розряди у повітряному включенні викликають обвуглювання діелектрика, його забруднення і власне підвищення напруженості поля на діелектрику.

Такі розряди мають частоту, яка визначається ємнісними параметрами та параметрами опорів витoku.

У твердих діелектриках можливі комбіновані форми пробою.

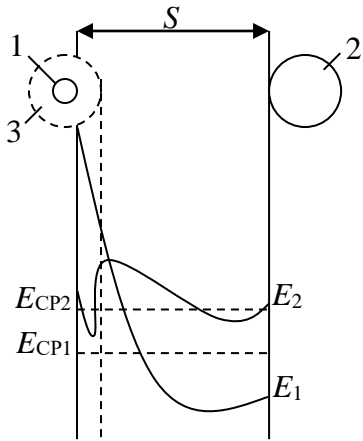
3.3 Комбінована ізоляція

Кожен діелектрик (газоподібний, рідкий, твердий) має певні переваги і недоліки. Найкращої відповідності властивостей ізоляції вимогам експлуатації дозволяє домогтися комбінація різних типів діелектриків.

1. Захисне покриття електрода з меншим радіусом кривизни тонким шаром твердого діелектрика не дає можливості утворюватися ланцюжкам і

місткам. Ефективно в середовищі з рідким діелектриком у слабо неоднорідних полях. Забезпечує зміцнення ізоляції на 50 %.

2. Захисне ізолювання електрода з малим радіусом кривизни (товщина шару діелектрика порівнянна з величиною міжелектродної відстані). У цьому випадку ізолюючий шар перерозподіляє електричне поле (зменшує максимальну напруженість поблизу електрода з малим радіусом кривизни.)



1, 2 – електроди;

3 – ізоляція;

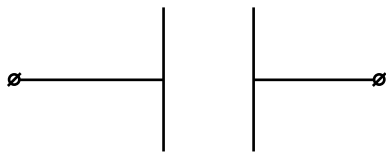
E_{CP1} – середня напруженість до нанесення захисного ізолювання;

E_1 – напруженість поля до нанесення захисного ізолювання;

E_{CP2} – середня напруженість в частинах поля після нанесення захисного ізолювання;

E_2 – напруженість в точках поля після нанесення захисного ізолювання.

3. Влаштування бар'єрів



Бар'єр являє собою тонку пластинку щільного діелектрика, вміщену в простір між електродами. Бар'єр поміщається на шляху можливого перекриття ізоляції ближче до електрода з найбільшою напруженістю поля.

Бар'єри, так само як і захисне покриття, перешкоджають утворенню наскрізних провідних ланцюжків. За рахунок цього ізоляція в однорідному полі зміцнюється на 30...50 % (при $f = 50$ Гц).

Основна ж роль бар'єрів полягає в тому, що вони затримують іони іонізації, що почалася, і за рахунок цього перерозподіляють електричне поле, роблячи його більше рівномірним. За рахунок цього ефекту ізоляції неоднорідного поля зміцнюється у 2...2,5 рази при установці бар'єру на відстані $0,1...0,25 S$ від електрода з меншим радіусом кривизни.

Заряди, що рухаються від коронуючого електрода, осаджуються на поверхні діелектричного бар'єра і напруженість поля між коронуючим електродом та бар'єром знижується (тобто цей ефект сприяє підвищенню електричної міцності).

Одночасно з цієї ж причини підвищується напруженість у частині проміжку, що залишилася. Однак, електричне поле в цій частині стає більш однорідним (наближається до поля «площина-площина») і зниження міцності не відбувається.

Сумарна дія бар'єра – підвищення електричної міцності проміжку.

Типовим представником комбінованої ізоляції є паперово-масляна ізоляція.

Електрична міцність самого масла складає 200 кВ/см, паперу – 100...150 кВ/см, а комбінованої паперово-масляної ізоляції – 500...600 кВ/см.

Зі зростанням числа шарів паперу міцність паперово-масляної ізоляції спочатку зростає (оскільки зменшується ймовірність збігу дефектних місць у шарах), а потім знижується (тому що погіршується тепловідвід і збільшується ймовірність теплового пробою). Крім того, збільшується напруженість внаслідок неоднорідності поля біля країв електродів.

3.4 Засоби, що підвищують міцність ізоляції

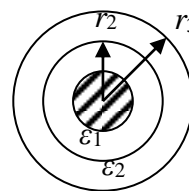
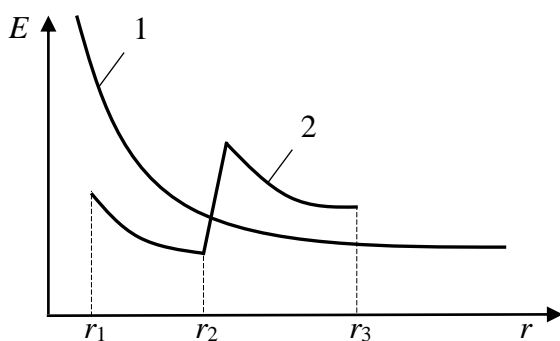
Міцність паперово-масляної ізоляції перебуває в сильній залежності від конфігурації електричного поля, в якому ця ізоляція працює. Тому основним способом підвищення міцності ізоляції є вплив на параметри електричного поля:

1. *Регулювання поля* – це застосування провідних або напівпровідних екранів, що усувають місцеві напруженості поля (наприклад, на поверхні багатопроволочних жил).

Такий же ефект дає застосування поверх ізоляції кожної жили власних металевих (або металізованих) екранів, а також застосування одножилних кабелів. Електричне поле при цьому стає строго радіальним, перпендикулярним шарам паперу, що забезпечує найбільшу міцність.

2. *Градуювання ізоляції*, що дозволяє більш рівномірно розподілити напруженість поля по товщині ізоляції.

Розглянемо ізоляцію одножилного кабелю зі струмопровідною жилою радіусом r_1 . У випадку використання однотипного діелектрика розподіл напруженості поля в радіальному напрямку буде нерівномірним (крива 1). Якщо ж застосувати ізоляційні матеріали двох типів з діелектричними проникностями ϵ_1 та ϵ_2 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$), то розподіл напруженостей поля буде йти за кривою 2.



Градуювання паперово-масляної ізоляції кабелів здійснюється за допомогою різних сортів паперу. Досягається це намотуванням більш тонкого й щільного паперу з більшою

електричною міцністю у внутрішніх шарах. Наступні шари виконуються з більш дешевої ізоляції.

Застосування підвищеного тиску масла використовується в кабельних та інших конструкціях. Механізм впливу тиску такий же, як і у газових проміжках.

3.5 Запобігання старіння ізоляції

Електричне старіння ізоляції викликається сильними електричними полями. При цьому в ізоляції мають місце часткові розряди та електрохімічні процеси. Суть цих процесів, полягає в тому, що під дією електричного поля іони та інші заряджені частки, неминуче присутні в технічних діелектриках, витягуються з об'єму ізоляції і скупчуються біля електродів. Тут іони беруть участь у хімічних реакціях з утворенням продуктів, які погіршують якість ізоляції (наприклад, утворюються газові включення).

При змінній напрузі електрохімічні процеси практично відсутні.

Електрохімічні процеси, що розглянуті вище, протікають у герметичних системах.

У негерметичних системах до цих процесів додаються зволоження та окислювання.

При постійному струмі важливу роль відіграють електролітичні процеси.

Особливо схильна до старіння паперово-масляна ізоляція. Швидкість реакції старіння визначається швидкістю переродження молекул

$$A = A_0 \cdot e^{k \cdot t} ,$$

де A_0 – початкове число молекул речовини в одиниці об'єму; k – імовірність розпаду молекули речовини в одиницю часу.

При переродженні целюлози зменшується її механічна міцність, вона легше піддається зволоженню.

Трансформаторне масло старіє, в основному, за рахунок окислювання, при якому зростає $\text{tg}\delta$ і питома провідність. Наявність води в маслі різко знижує його електричну міцність та збільшує $\text{tg}\delta$.

Крім того, вода переходить у папір який набуває вологість в 1000 разів вище, ніж вологість масла.

Середня вологість паперу, що перебуває в маслі – 4 %. Вона дуже впливає на процеси старіння. Так збільшення вологості паперу з 0,7 до 7 %%% призводить до прискорення процесів старіння в 16 разів.

Теплове старіння проявляється в хімічному переродженні ізоляції, виникненні місцевих дефектів і т.д. Існує так зване 10-ти градусне правило, тобто старіння ізоляції прискорюється в 2 рази при підвищенні температури на кожні 10°C .

Саме по собі теплове старіння, практично не змінює електричної міцності, але викликає механічні руйнування, які ведуть до електричного пробую.

Таким чином, у твердій і комбінованій ізоляції можливі різні форми пробую, залежно від часу впливу напруги.

Для запобігання старіння масла застосовують антиокислювальні присадки (інгібітори), термосифонний фільтр безперервної регенерації масла, азотний захист, герметизацію системи і т.д.

4 Ізоляційні конструкції

Сучасні електроенергетичні системи містять 3 головні види ізоляції:

- *станційна ізоляція* – ізоляція електроустаткування для внутрішньої установки (оберткові машини, електричні апарати, силові трансформатори, прохідні і опорні ізолятори та ін.);
- *підстанційна ізоляція* – ізоляція електроустаткування зовнішньої установки (трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі);
- *лінійна ізоляція* – ізоляція повітряних і кабельних ліній.

Крім того, ізоляцію ділять на внутрішню та зовнішню.

Внутрішня – ізоляційні пристрої та конструкції, що перебувають у рідкому, напіврідкому або твердому середовищі, а також в газовому середовищі, яке ізольоване від атмосфери.

Зовнішня – ізоляційні пристрої та конструкції, що перебувають у повітрі та розташовані таким чином, що електричний розряд відбувається або по повітрю, або по повітрю уздовж поверхні ізолятора.

4.1 Ізолятори високої напруги

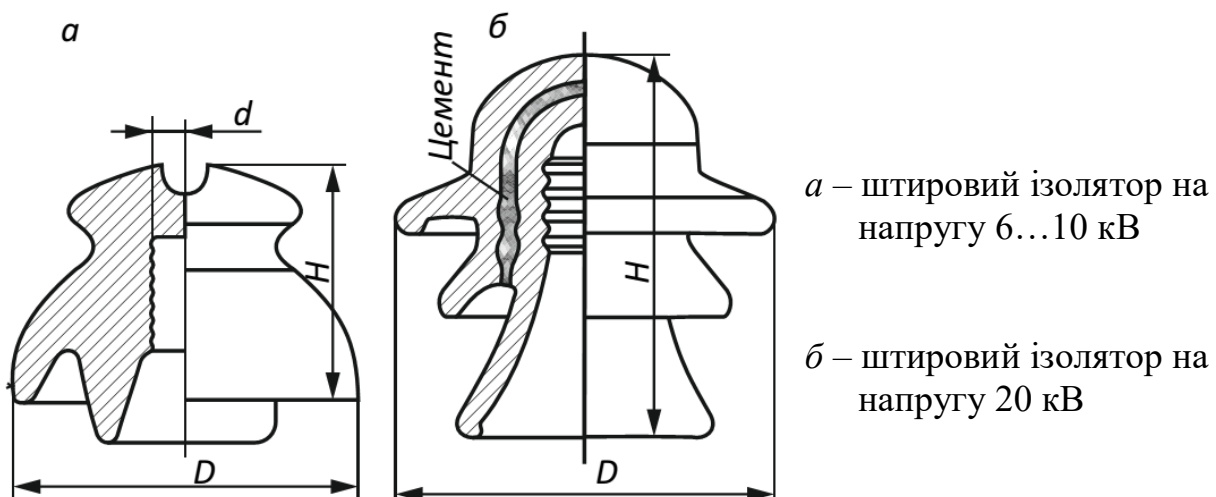
4.1.1 Класифікація та конструкції ізоляторів

За призначенням ізолятори підрозділяються на *лінійні* та *станційно-апаратні*.

1. Лінійні ізолятори застосовуються для кріплення та ізолювання проводів і тросів повітряних ліній електропередачі. За конструктивним виконанням вони поділяються на штирові та підвісні.

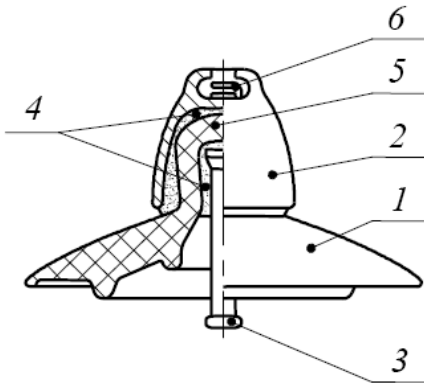
Штирові ізолятори виготовляються з електротехнічного фарфору або скла і монтуються на опорах за допомогою штирів або гаків. Вони випускаються різного конструктивного виконання і застосовуються, в основному, на лініях напругою до 10 кВ і значно рідше на лініях 20 і 35 кВ.

Ізолятор наvertsється на металевий штир, за допомогою якого він кріпиться на траверсі опори. Провід закріплюється за допомогою дротяної в'язки або спеціальних затискачів у верхній канавці або на шийці ізолятора.



Підвісні ізолятори застосовуються для напруг більше 35 кВ. Поділяються на тарілчасті (шарнірні) та стержневі.

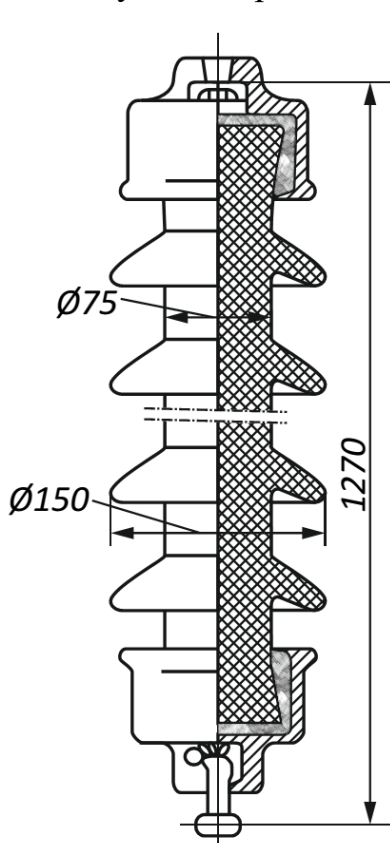
Тарілчасті виготовляються з електротехнічного фарфору або скла. Шапка (2) і стержень (3) забезпечують шарнірне з'єднання одного ізолятора з іншим при складанні їх у гірлянду.



- 1 – тарілка ізолятора
- 2 – чавунна шапка
- 3 – сталевий стержень
- 4 – цементна замазка
- 5 – головка ізолятора
- 6 – замок

Ізолятори зазнають тільки зусилля що розтягують, але, завдяки конструктивним виконанням, головка ізолятора (5) працює на стиск і тому витримує дуже великі механічні навантаження.

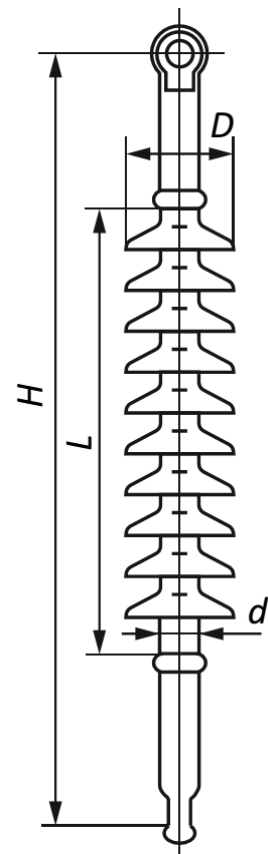
Стержневі ізолятори виготовляються з електротехнічного фарфору, скла, сітала, скловолокна з полімерним покриттям. Один ізолятор може замінити гірлянду з 7 тарілчастих ізоляторів на напругу 110 кВ. Шарнірно кріпиться за допомогою двох шапок з замками на кінцях ізолятора. Їх перевагою є непробивність. Крім того, за рахунок малого діаметра ізолятора підвищуються градієнти електричного поля по поверхневому перекриттю.



Стержневі фарфорові ізолятори (рис. ліворуч) представляють суцільний стержень з ребрами, армований зверху і знизу металевими шапками з конічними внутрішніми поверхнями.

Їх механічна міцність менше, ніж у тарілчастих, оскільки фарфор в стержневих ізоляторах працює на розтяг, а іноді і на вигин.

Несучою конструкцією полімерного ізолятора (рис. праворуч) зазвичай є склопластиковий стержень, який має слабку дугостійкість. Цей стержень закривають ребристим чохлом з кремнійорганічної гуми або фторопласту, які володіють

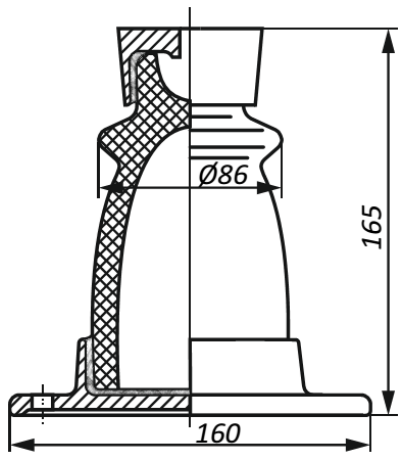


відштовхуючими властивостями до вологи і забруднень.

2. Станційно-апаратні, в свою чергу, поділяються на опорні та прохідні.

Опорні використовуються для кріплення шин і струмопроводів відкритих і закритих розподільних пристроїв та апаратів.

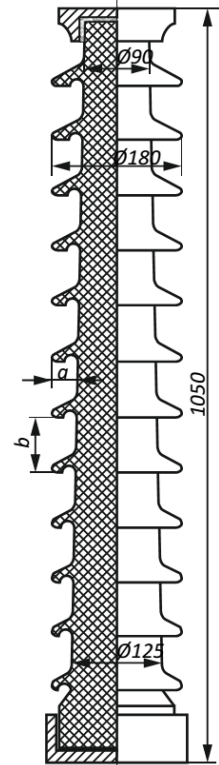
Основним ізолюючим матеріалом опорних ізоляторів є фарфор. В прохідних ізоляторах на напругу 35 кВ і вище також широко використовується паперово-масляна і масло-бар'єрна ізоляція.



Ізолятори для внутрішньої установки на напругу 3 ... 35 кВ (рис. ліворуч) виконуються, як правило, стержневого типу і складаються з фарфорового тіла і металевої арматури.

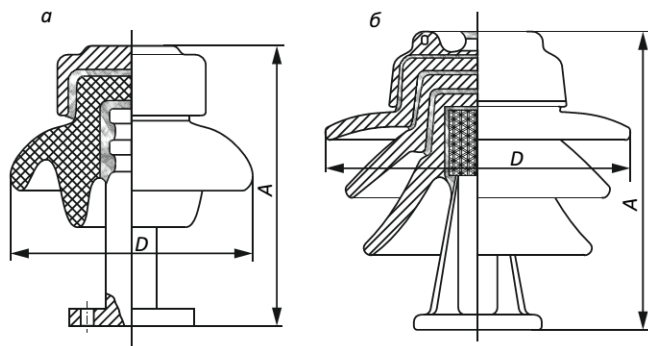
Ізолятори для зовнішньої установки випускаються на напруги до 110 кВ (рис. праворуч).

На напругу 330 кВ і вище одиночні колонки ізоляторів виходять



дуже високими і не забезпечують необхідну механічну міцність на вигин. Тому при цих напругах застосовують опорні конструкції найчастіше у вигляді конусоподібного триніжка з трьох колонок ізоляторів. При згинаючих зусиллях ізолятори в таких конструкціях працюють не тільки на вигин, а й на стиск.

Штирові ізолятори зовнішньої установки випускаються на напруги 6 ... 35 кВ.



Вони складаються з одного (рис. *a*), двох або трьох (рис. *б*) фарфорових тіл, скріплених за допомогою цементу один з одним і з арматурою.

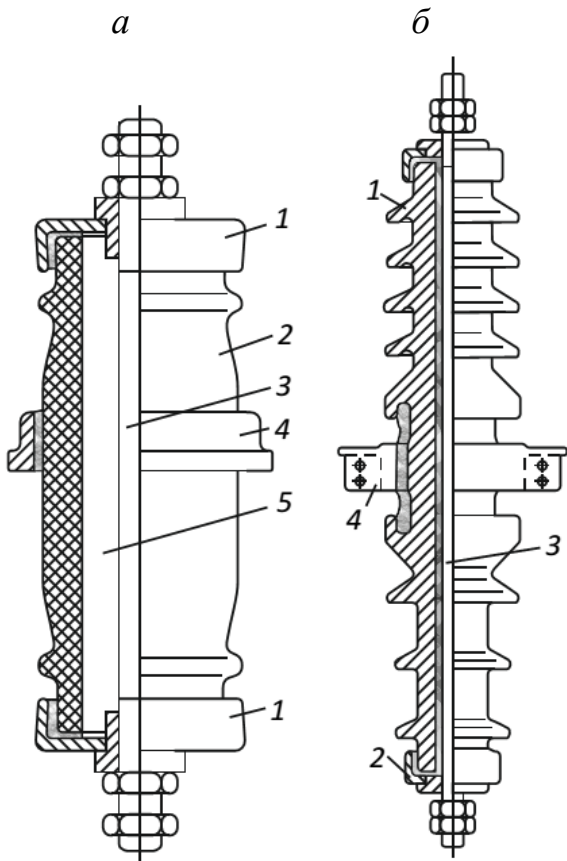
На напругу 110, 150 і 220 кВ штирові ізолятори збираються в колонки відповідно з трьох, чотирьох і п'яти ізоляторів 35 кВ.

Прохідні ізолятори застосовуються при переході струмопроводів крізь стіни або для введення напруги всередину металевих баків трансформаторів, конденсаторів, вимикачів та інших апаратів.

Ізолятори на напругу 6...35 кВ найчастіше виготовляються фарфоровими. Їх конструктивне виконання визначається напругою, струмом, допустимим механічним навантаженням на вигин і умовами навколишнього середовища.

Ізолятор складається з фарфорового тіла циліндричної форми 1, щільно скріпленого за допомогою армованих на цементі металевих кінцевих ковпачків 2 зі струмоведучим стержнем 3. Фланець 4 служить для кріплення ізолятора до стіни будівлі або корпусу апарату.

Може бути суцільної конструкції або з внутрішньої повітряною порожниною.

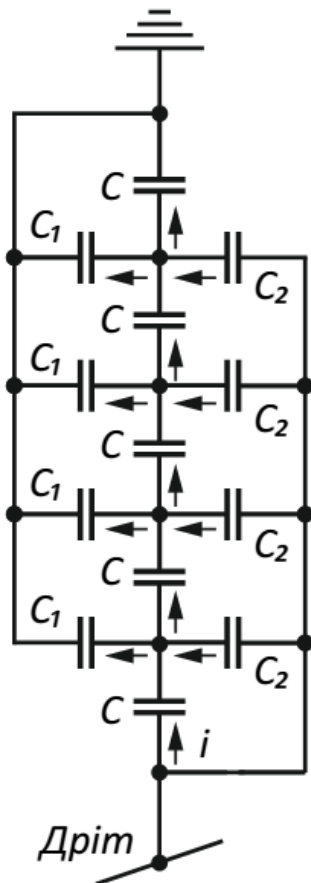


a – на напругу 6...10 кВ внутрішньої установки

б – на напругу 35 кВ зовнішньої установки

Прохідні ізолятори на напругу вище 110 кВ називаються *увідами*. Вони містять зовнішню і внутрішню ізоляцію. Бувають масло-бар'єрні і паперово-масляні.

4.1.2 Розподіл напруги уздовж гірлянди ізоляторів



Напруга, прикладена до гірлянди, по тарілчастим ізоляторам розподіляється нерівномірно.

Для з'ясування причин цього складається схема заміщення гірлянди. На ній C – власна ємність ізолятора, для тарілчастих ізоляторів складає 50...70 пФ; C_1 – ємність ізолятора по відношенню до землі; C_2 – ємність ізолятора по відношенню до проводу.

Значення ємностей C_1 і C_2 залежать від положення ізолятора в гірлянді (в середньому $C_1 = 4...5$ пФ, $C_2 = 0,5...1$ пФ) і обумовлюють нерівномірний розподіл напруги по елементах гірлянди.

Внаслідок відгалуження струму в ємності C_1 , струми, що проходять через власні ємності ізоляторів (C) і, відтак, падіння напруги на ізоляторах будуть тим менше, чим далі від проводу вони знаходяться.

Якщо розглянути вплив тільки ємностей C_2 , то струми через ємності C і, відповідно, падіння напруги будуть менше на тих ізоляторах, які знаходяться далі від заземленого кінця гірлянди.

У реальних умовах (при $C_1 > C_2 \neq 0$) найбільші напруження прикладаються до ізолятора, розташованого

біля проводу, найменші – до ізоляторів середини гірлянди, і дещо підвищені – до ізоляторів у заземленого кінця.

У разі необхідності додатковою мірою регулювання розподілу напруги по ізоляторах гірлянди може служити спеціальна арматура у вигляді кілець, вісімок або овалів, що кріпиться на кінці гірлянди з боку проводу. Така арматура збільшує ємність ізоляторів по відношенню до проводу, завдяки чому падіння напруги на них зменшується.

4.1.3 Основні характеристики ізоляторів

Сухорозрядна напруга – найменша напруга промислової частоти, при якій по сухій і чистій поверхні ізолятора відбувається іскровий розряд. Значення сухорозрядної напруги визначається так званою розрядною напругою – найкоротшою відстанню по повітрю між електродами.

Мокророзрядна напруга ізолятора – найменша напруга промислової частоти, при якій відбувається іскровий розряд по ізолятору при впливі на нього рівномірних водяних струменів під кутом 45° до обрію (нормований дощ). При цьому ізолятор повинен знаходитись в нормальному робочому положенні. Сила дощу – 3 мм/хв, питомий опір води 9500...10500 Ом·см.

Мокророзрядна напруга зазвичай на 20...30 % нижче сухорозрядної.

Пробивна напруга ізолятора – найменша напруга промислової частоти, при якій відбувається пробій діелектрика через товщу ізолятора.

Так, наприклад, для фарфору

$$U_{пр} = 80 \cdot \sqrt[3]{S^2} \quad , \text{кВ}$$

де S – товщина (найменша) фарфору в см.

Імпульсна розрядна напруга – амплітуда стандартної (або зрізаної) хвилі, при прикладанні якої настає імпульсний розряд в 50 % дослідів.

Гарантована механічна міцність – плавно зростаюче механічне навантаження, при якому настає часткове або повне руйнування ізолятора.

Електромеханічна міцність ізолятора – величина механічного навантаження, що ушкоджує ізолятор під впливом 0,75...0,8 сухорозрядної напруги.

Це ушкодження виявляється за електричним пробоем.

Годинне випробне навантаження – дорівнює 75 % електромеханічної міцності. Ізолятор повинен витримувати годинне випробне навантаження не руйнуючись.

Останнє зазвичай вказується в маркуванні ізолятора.

На практиці ізолятори вибираються та встановлюються таким чином, щоб максимально сталі навантаження не перевищували 50 % годинного випробного навантаження.

4.1.4 Вибір ізоляторів для ліній і РП

Число аварійних відключень електроустановок через перекриття ізоляторів повинне бути досить мало за всіх можливих метеоумов.

Досвід показує, що визначальною є умова вибору ізоляторів за робочою напругою. Число ж відключень при перенапругах виявляється незначним, тому що воно обмежено засобами грозозахисту, АПВ та іншими заходами.

Для кожної місцевості з певними метеоумовами і забрудненням атмосфери, середнє число відключень при робочій напрузі буде залежати від величини

$$L_{\text{ЭФ}} / U_{\text{Л МАКС}} = \lambda_{\text{Э}} - \text{питома довжина витоку.}$$

Відомо що напруга перекриття залежить від характеристик шару забруднення та пропорційна довжині шляху витоку L_y по поверхні ізолятора. Але поверхні ізоляторів забруднюються і звожуються нерівномірно.

Окрім того, при складній формі ізолятора розряд на окремих ділянках може відриватися від поверхні та розвиватися за найкоротшим шляхом у повітрі.

У результаті використовується не вся геометрична довжина шляху витоку L_y , а тільки її частина, тому напруга перекриття пропорційна не геометричній, а ефективній довжині шляху витоку

$$L_{\text{ЭФ}} = L_y / K ,$$

де $K > 1,0$ – поправочний коефіцієнт, який називається коефіцієнтом форми ізолятора.

Для тарілкового ізолятора

$$K = 1 + 0,5 \cdot (L_y / D - 1)$$

Для гірлянди ізоляторів

$$L_{\text{ЭФ}} = n \cdot L_y / K$$

Величина питомого шляху витоку $\lambda_{\text{Э}}$ нормується залежно від ступеня забруднення атмосфери. Таким чином, число ізоляторів у гірлянді

$$n \geq \lambda_{\text{Э}} \cdot U_{\text{Л МАКС}} / L_{\text{ЭФ}}$$

На лінії монтують збільшене в порівнянні з розрахунковим n число ізоляторів (як правило, на один ізолятор більше) для того, щоб гірлянда зберігала працездатність при одному ізоляторі, що вийшов з ладу.

Рекомендується застосовувати для гірлянди на металевих і залізобетонних опорах наступну кількість ізоляторів:

Напруга ЛЕП, кВ	Кількість ізоляторів, шт.
до 10	1
20...35	3
110	7...8
150	9...10
220	12...14
330	16...18
500	19...21

4.2 Ізоляція кабельних ліній

Кабельні лінії електропередач значно дорожче повітряних. Вони прокладаються в густонаселених забудованих районах. Для кабельних ліній першорядне значення має ізоляційна проблема.

Кабелі високої напруги, як правило, складаються з наступних елементів:

- струмопровідної жили, ізоляції, що накладається на жилу;
- герметизуючої оболонки зі свинцю або алюмінію, що накладається зверху ізоляції;
- броні зі сталеві стрічки або дроту, що уберігає кабель від зовнішніх впливів.

Для захисту броні та герметизуючої оболонки від корозії, кабелі обмотують стрічками бітумінізованого паперу, тканини або кабельної пряжі, просоченої антисептиком.

Кабелі зазвичай мають форму циліндра діаметром не більше 10...12 см, оскільки при більших діаметрах вони стають недостатньо гнучкими, що ускладнює їх намотування на барабан і прокладку. З'єднання кабелів у єдину лінію здійснюється за допомогою сполучних кабельних муфт, а кінці кабельної лінії мають кінцеві муфти.

Максимальний перетин однодротової алюмінієвої жили – 240 мм², багатодротової – 625 мм².

Основним видом ізоляції силових кабелів ВН в цей час є просочена паперова ізоляція. Паперові стрічки завширшки 5...30 мм із кабельного паперу 0,02...0,17 мм щільно намотується на струмопровідні жили із зазором 1...2 мм.

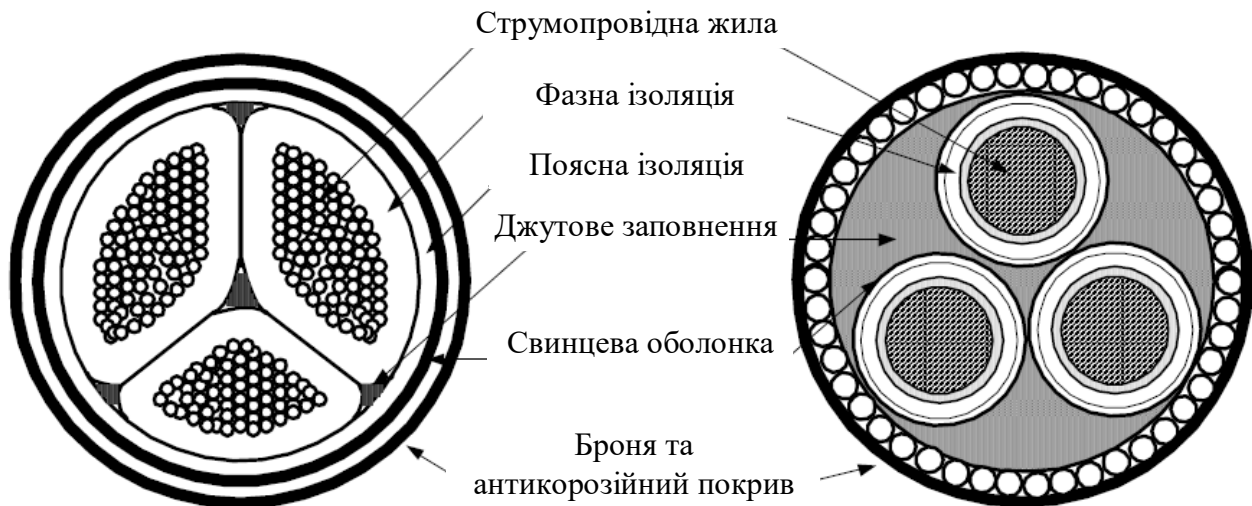
Наявність зазору дозволяє паперовій стрічці при згинанні кабелю переміщатися без деформації. Стрічки шару, який знаходиться вище, повинні перекивати зазори між витками нижчого.

Просочення паперу виконується кабельним маслом, в'язким компаундом або газом. У якості в'язких компаундів, що просочують, використовуються масло-каніфольні та синтетичні сполуки.

Поряд з рідкими діелектриками для просочення кабелів використовують гази (азот, елєгаз). У якості ізоляції та захисних оболонок кабелів знаходить застосування пластмаса. Вона технологічна, має високу електричну щільність і гарні фізико-хімічні характеристики.

4.2.1 Кабелі з в'язким просоченням

Кабелі з в'язким просоченням виготовляються на напругу до 35 кВ. Вони випускаються декількох типів з 1...4 жилами. На рисунку наведена конструкція трижильного кабелю з поясною ізоляцією та секторними жилами. При такій формі жил досягається найбільш повне використання об'єму кабелю.



Наявність поясної ізоляції дозволяє збільшити ще й ізоляцію жил, відносно оболонки без збільшення фазної ізоляції.

Поміж свинцевою оболонкою та бронею намотується шар кабельної пряжі, просоченої бітумом, що зменшує імовірність зминання свинцевої оболонки в місцях вигину кабелю.

Зниження терміну служби кабелів із в'язким просоченням пов'язане, у першу чергу, з ізоляцією повітряних включень. При збільшенні напруги пухирець втягується в область сильних напруженостей і відбувається його дроблення іонами. Струм іонізації пропалює шар паперу, потім продукти газомасляної емульсії виходять до наступного шару, витісняючи масло. Далі відбувається пробій наступного шару й т.д.

Ці процеси тривають довго – іноді десятками років, але дуже прискорюються при підвищенні напруги.

Повітряні включення з'являються в ізоляції при змінному тепловому режимі. Кабель (оболонка) при перегріві роздувається, а потім при наступному охолодженні не повертається у вихідний стан, тобто залишаються порожнечі, які заповнюються газом з ізоляції.

Недолік кабелів з поясною ізоляцією – значна тангенціальна складова напруженості поля, спрямована уздовж шарів паперу. Ця складова істотно зменшує електричну міцність кабелю. З цих причин напруженість поля в кабелях з поясною ізоляцією не передбачається вище 32 кВ/см.

Для більш високих напруг (20, 35 кВ) застосовуються кабелі з окремими освинцьованими жилами. Електричне поле таких кабелів суворо радіально, тому можливо виконати кабелі на більшу напругу. Робоча напруженість допускається до 42 кВ/см.

Міцність паперово-масляної ізоляції на постійному струмі набагато вище, ніж на змінному (робоча напруженість допускається до 300 кВ/см), що дозволяє виготовляти кабелі напругою до 200 кВ.

Для вертикальної прокладки випускаються кабелі зі збідненим просоченням. Електрична характеристика таких кабелів гірша, товщина ізоляції на 40% більше. Просочення таких кабелів виконується в'язкими або нестікаючими складовими.

4.2.2 Маслонаповнені кабелі

Виготовляються на напругу 110 кВ і вище. Ізоляція просочується високоякісним маслом під тиском 0,4...0,5 МПа (кабелі низького тиску, робоча напруженість 60...100 кВ/см) або 0,7...1,5 МПа (високого тиску, робоча напруженість до 180 кВ/см).

Масляний канал виконується в центрі кабелю або у виточках свинцевої оболонки. Через 1...2,5 км встановлюються спеціальні баки живлення, які підключаються до кабелю в кінцевих і стопорних муфтах. Останні розбивають кабель на окремі герметизовані ділянки.

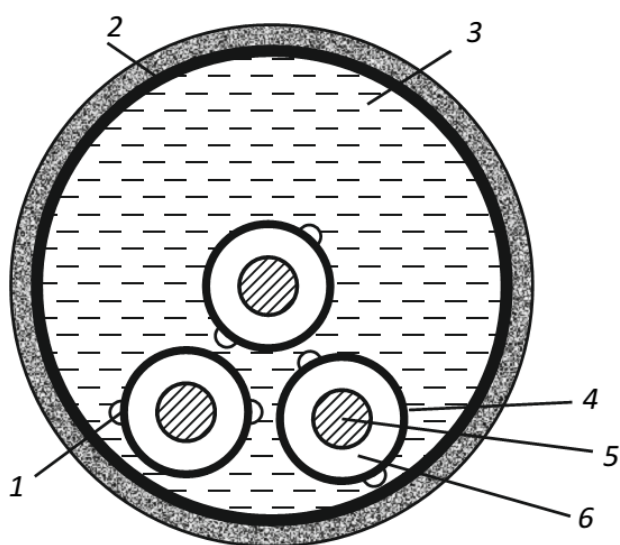
Для зменшення небезпеки теплового пробую застосовуються високоякісні матеріали з високим $\text{tg}\delta$.

Характеристики кабелів погіршуються при мінусовій температурі.

Кабелі високого тиску зазвичай одножильні.

Різновидом кабелів високого тиску є кабелі в сталевих трубах. Ізольовані та екрановані жили, оснащені накладеними на них напівкруглими дротами ковзання, розміщуються в сталевих трубах. Сталева труба сприймає на себе тиск масла і є захистом кабелю від механічних пошкоджень.

Ізоляція кожної з жил просочена в'язкою сполукою і покрита еластичним герметично щільним покривом (поліетилен).



- 1 – напівкруглий дріт;
- 2 – сталеві труба;
- 3 – масло;
- 4 – герметизуючі покриття;
- 5 – жила;
- 6 – ізоляція.

Герметизуючий покрив відокремлює ізоляцію від порівняно низькоякісного масла в трубі, але не заважає передачі тиску масла в трубопроводі на ізоляцію.

Підтримка необхідного тиску в трубі здійснюється за допомогою автоматичних підживлювальних пристроїв, що встановлюються на кінцях лінії.

4.2.3 Газонаповнені та інші кабелі

Газонаповнені кабелі застосовуються для вертикального прокладання при великому перепаді висот. При цьому можливі два варіанти:

- газ вводиться безпосередньо в ізоляцію;
- ізоляція збіднена паперово-масляна, газ в трубопроводі служить не для ізоляції, а тільки для створення тиску.

Перспективними є застосування кабелів із пластмасовою ізоляцією. Нові види пластмас дозволяють одержати гарні характеристики ізоляції, однак навантажувальна здатність таких кабелів нижче чим кабелів з паперово-масляною ізоляцією.

Для надвисоких напруг (750...1150 кВ) конкурентноспроможними є кабелі з газовою (елегаз) ізоляцією під тиском.

В даний час кабелі з паперовою ізоляцією в класах середньої та високої напруги (10 ... 220 кВ) активно замінюють кабелі з пластмасовою ізоляцією.

Серед пластмасових ізолюючих матеріалів найбільш сучасним є зшитий поліетилен (ЗПЕ), що відрізняється хорошими діелектричними властивостями і високою термічною стійкістю.

Термін «зшивання» (вулканізація) має на увазі обробку поліетилену на молекулярному рівні. Поперечні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка і визначає високі електричні і механічні характеристики матеріалу, меншу гігроскопічність, більший діапазон робочих температур.

Існує три основних способи зшивання поліетилену: пероксидна, сіланова і радіаційна. У світовій кабельній промисловості при виробництві силових кабелів використовуються перші дві.

Пероксидна відбувається в середовищі нейтрального газу при температурі 300...400 °С і тиску 20 атм. Вона застосовується при виробництві кабелів середньої та високої напруги.

Сіланова здійснюється при більш низькій температурі. Сектор застосування цієї технології охоплює кабелі низької та середньої напруги.

Головними перевагами таких кабелів в порівнянні з кабелями з паперовою ізоляцією є:

- допустимі струми навантаження на 20...30% більше;
- більший струм термічної стійкості при КЗ;
- нижчі масогабаритні показники;
- пошкоджуваність в 3...50 разів нижче;
- менші витрати на ремонт;
- зменшення часу і вартості прокладки і монтажу.

В даний час в США і Канаді частка кабелів з ізоляцією із ЗПЕ становить 85%, в Німеччині та Данії – 95%, а в Японії, Франції, Фінляндії та Швеції в розподільних мережах середньої напруги використовується тільки кабель з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

4.3 Ізоляція трансформаторів

Ізоляція трансформаторів підрозділяється на зовнішню й внутрішню.

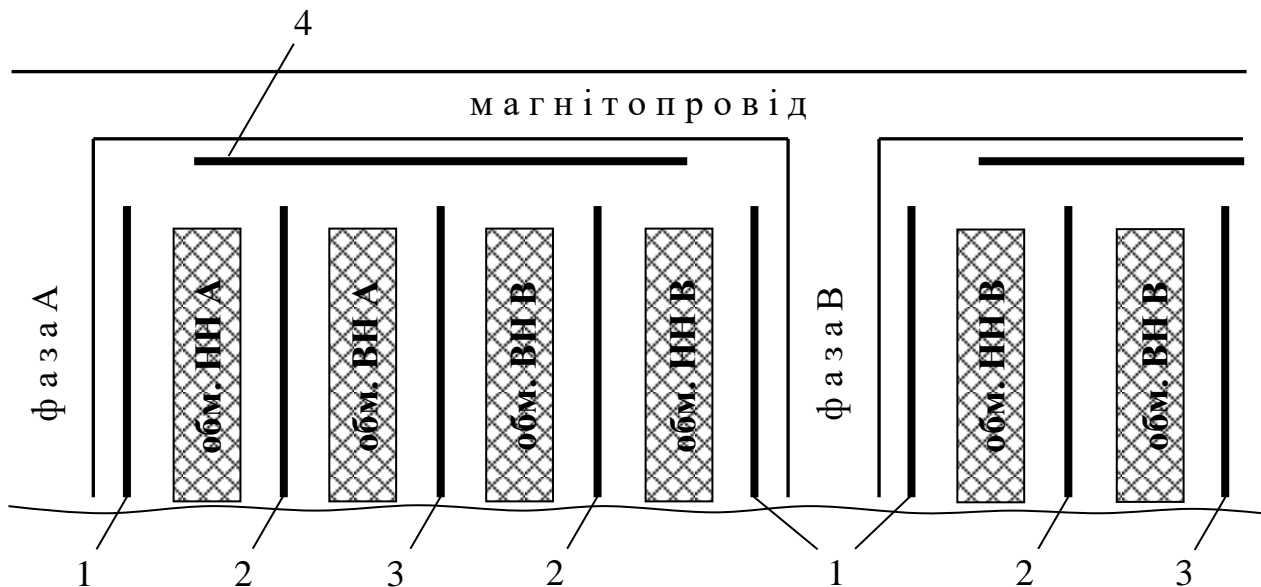
До *зовнішньої* ізоляції належать повітряні проміжки між уводами різних фаз, а також всі проміжки, по яких може відбутися розряд у повітрі по поверхні діелектрика (наприклад, поміж лінійними затискачами уводів і корпусом трансформатора).

Для трансформаторів пошкодження внутрішньої ізоляції – це розряди в масляному проміжку або в маслі по поверхні твердого діелектрика. Практично це всі пошкодження всередині бака трансформатора.

Внутрішня ізоляція ділиться, у свою чергу на головну (поперечну) і поздовжню.

Таким чином ізоляція обмотки однієї фази від інших, а також ізоляція обмоток від заземлених частин трансформатора (сердечника, бака) відноситься до головної ізоляції, а ізоляція між витками, шарами, котушками та відводами однієї і тієї ж фази – до поздовжньої ізоляції.

По конструкції, ізоляція трансформаторів – *маслобар'єрна*.



- 1 – ізоляційний циліндр між обмоткою НН і магнітопроводом;
- 2 – циліндричний бар'єр з бакелізованного паперу або картону (ізоляція між обмотками ВН і НН однієї фази);
- 3 – пласка поміжфазова перегородка (електрокартон);
- 4 – щиток з картону (бар'єр в ізоляції обмотки ВН-магнітопровід).

У трансформаторах невеликої потужності напругою до 35 кВ застосовуються циліндричні обмотки (обмотка намотується в кілька шарів на паперово-бакелітовий циліндр). Для охолодження поміж деякими шарами обмотки залишаються масляні канали.

У трансформаторах номінальною напругою 110 кВ і вище, а також в трансформаторах великої потужності частіше застосовуються котушкові обмотки. Для підвищення електричної міцності і кращого охолодження поміж котушками теж залишаються масляні канали.

Для трансформаторів 110 кВ додатково встановлюються кутові Г-образні шайби, посилена ізоляція перших витків котушок (з торців), ємнісні кільця і т.д.

Трансформатори на більш високі напруги (220 кВ і вище) мають ще більш складну конструкцію з відводом всередині котушки.

4.4 Ізоляція обертових машин

Тяжкі умови експлуатації електричних машин висувають наступні вимоги до ізоляції:

- великий опір;
- низькі діелектричні втрати;
- висока короностійкість;
- висока напруга початку іонізації;
- механічна міцність та монолітність;
- гарна теплопровідність.

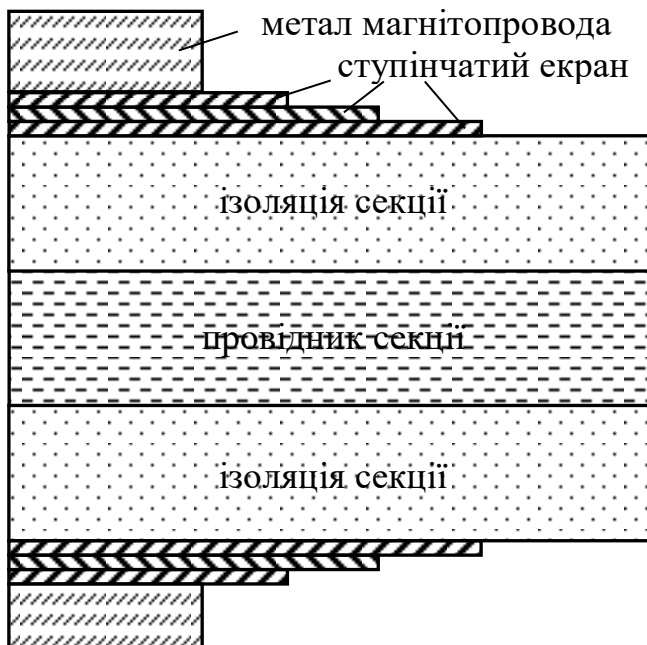
За конструкцією ізоляція статорів електричних машин поділяється на гільзову і безперервну.

Гільзова ізоляція є комбінованою. Частини обмотки, закладені в пази, поміщаються в гільзи з мікафолію, а лобові частини обмотки, що знаходяться в повітрі, ізолюються обмоткою мікострічки, лакотканинної стрічки та ін. У результаті гільзова ізоляція по довжині має різну конструкцію. В місцях стику електрична міцність ослаблена, тому гільзова ізоляція застосовується в машинах відносно малої потужності й невисокої напруги.

Безперервна ізоляція виконується з мікострічки по всій довжині обмотки. Вона має однакову електричну міцність. Мікострічка наноситься на обмотку врівнахлесту. Число шарів приблизно дорівнює числу кіловольт напруги плюс 1...2 шари (у пазових частинах додаються ще 1...2 шари). Стержні обмотки, ізольовані мікострічкою, сушаться, вакуумуються та просочуються рідким компаундом під тиском.

Зверху секції покриваються напівпровідним лаком для усунення іонізації повітряних включень поміж стінками паза і обмоткою.

Середня щільність такої ізоляції до 20 кВ/мм, $\text{tg}\delta \approx 0,4$. Однак, робочі напруженості приймаються в 10 разів менше (десятикратний запас міцності).



Цей запас передбачений на розкид параметрів, старіння ізоляції і т.д. У потужних турбогенераторах і двигунах застосовуються склослюдинітові стрічки, просочені епоксидними смолами та кремнійорганічними лаками.

В даний час номінальні напруги генераторів досягають 24 кВ, а номінальні потужності 1200 МВт. Величезні робочі струми таких машин викликають масу труднощів, зокрема навіть передача енергії від генератора до трансформатора стає проблемою. У зв'язку із цим ведуться роботи з підвищення номінальної

напруги генераторів. Вже є гідрогенератори на 110 кВ. Такий генератор може працювати на повітряну лінію безпосередньо, без трансформатора, тому його ізоляція розраховується на вплив грозових перенапруг, обмежених пристроями захисту.

Мікастрічка є шар щипаної слюди, обклеєний з двох сторін папером. Ширина стрічки 12...35 мм, товщина 0,08...0,17 мм. Вона гнучка в холодному стані. Клейкий масляно-бітумний лак забезпечує її щільне намотування до потрібної товщини ізоляції.

Мікафолій містить 2...3 шари щипаної слюди і з одного боку обклеюється папером. Товщина мікафолію 0,2...0,3 мм. У порівнянні з мікастрічкою він менш гнучкий, ізолювання ведеться в підігрітому стані.

Слюдиніти виготовляються з подрібненої слюди у вигляді стрічок або листів.

5 Профілактичні випробування ізоляції

Контроль ізоляції в експлуатації або профілактика ізоляції слугує для виявлення дефектів в ізоляційних конструкціях і наступній їх заміні або відновленні на місці.

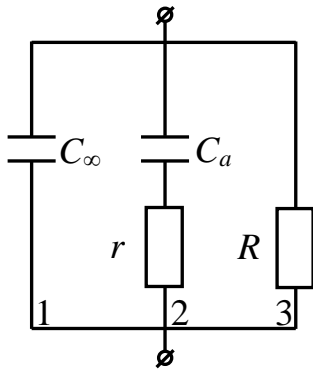
Повноцінну інформацію про якість ізоляції дає її випробування підвищеною напругою. Однак, воно пов'язане з ризиком пробою ще придатної ізоляції, тобто такий контроль відноситься до *руйнуючих* методів. Іншу групу методів складають випробування, не пов'язані з підвищенням напруги – так звані *неруйнуючі*. Вони є непрямими, тобто контролюють не електричну міцність ізоляції, а інші параметри, які змінюються разом зі зміною електричної міцності.

Для виявлення таких параметрів і аналізу їх зв'язку з міцністю ізоляції складаються схеми заміщення діелектриків.

5.1 Схеми заміщення діелектриків

Будь-яка ізоляція являє собою діелектрик, а ізоляційна конструкція – конденсатор якоюсь ємністю C_∞ і опором R , тобто схема заміщення повинна містити паралельне коло C_∞ – R .

Однак при включенні ізоляційної конструкції на постійну напругу вона заряджається не миттєво, тобто має місце перехідний процес. Це говорить про наявність послідовного ланцюжка C_a – r . Вочевидь, що більш повно процеси в діелектрику відображаються схемою заміщення, яка містить і послідовний і паралельний ланцюжки.



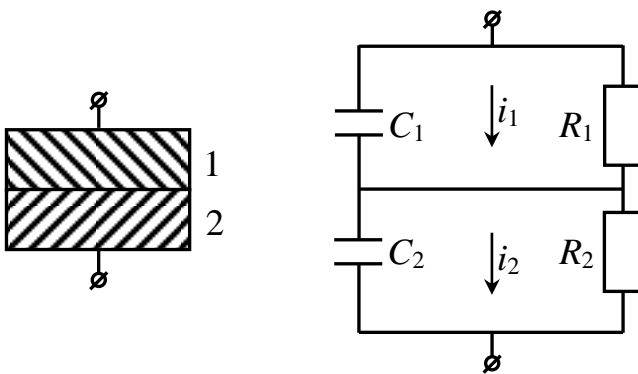
C_∞ – ємність конструкції, обумовлена геометричними розмірами та всіма видами швидкої поляризації (електронною, іонною, деформацією молекул). Величина цієї ємності не залежить від частоти аж до порядку мегагерц;

C_a – додаткова ємність, обумовлена процесами накопичення (абсорбції) зарядів при неоднорідностях структури;

r – опір міжшарової поляризації. Особливого фізичного сенсу не має, характеризує швидкість процесів перезаряду і втрати на повільну поляризацію;

R – опір наскрізної провідності.

Розглянута схема може бути також отримана з фізичної моделі неоднорідної ізоляції.



У перший момент ($t = 0$) після включення неоднорідної ізоляції на постійну напругу відбувається розподіл напруги по ємностях так, що

$$U = U_1 + U_2$$

$$U_{10} / U_{20} = C_2 / C_1$$

Струми наскрізного витоку через діелектрик

$$i_1 = U_1 / R_1 \quad \text{и} \quad i_2 = U_2 / R_2$$

Наприкінці всіх перехідних процесів ($t = \infty$) розподіл напруги буде визначатися вже не ємностями, а опорами, тобто

$$U_{1\infty} / U_{2\infty} = R_1 / R_2$$

Розподіл напруги між шарами залишиться незмінним

$$U_{10} / U_{20} = U_{1\infty} / U_{2\infty}$$

у тому випадку, якщо

$$C_2 / C_1 = R_1 / R_2 \quad , \quad \text{тобто} \quad C_2 \cdot R_2 = C_1 \cdot R_1$$

Остання рівність справедлива тільки для однорідної ізоляції. Інакше кажучи, при включенні однорідної ізоляції на постійну напругу, ємності заряджаються практично миттєво, без перехідного процесу.

Якщо ж діелектрик (ізоляція) неоднорідний тобто $C_2 \cdot R_2 \neq C_1 \cdot R_1$

$$U_{10} \neq U_{1\infty} \quad \text{и} \quad U_{20} \neq U_{2\infty} \quad ,$$

то ємності діелектрика будуть перезаряджатися, з'явиться струм у зовнішньому колі, тобто ізоляція в цілому одержить додатковий заряд.

Експоненціальна складова струму перезаряду ємностей називається *струмом абсорбції*.

Параметри схем заміщення такі, що дозволяють записати наступні вирази:

$$C_\infty = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2) \quad , \quad R_\infty = R_1 + R_2$$

$$C_{abc} = \frac{(R_1 \cdot C_1 - R_2 \cdot C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2 \cdot (C_1 + C_2)}$$

Параметр C_{abc} отримаємо з умови $C = C_\infty + C_{abc}$, а заряд абсорбції – це різниця зарядів на електродах ємностей C_1 і C_2 .

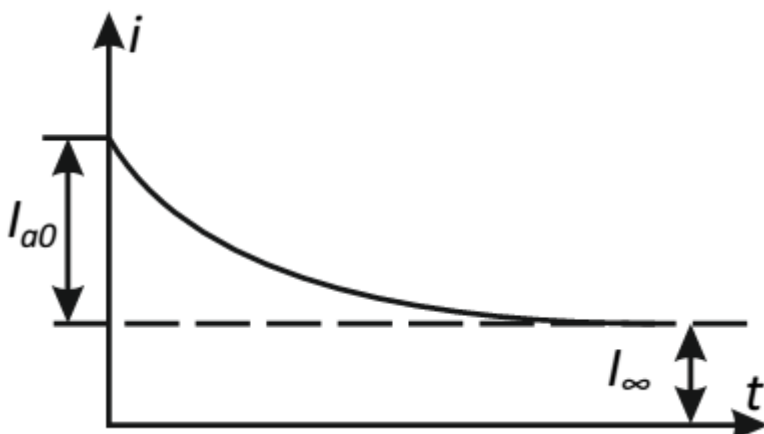
Таким чином, заряд абсорбції та пов'язані з ним явища характеризують неоднорідність ізоляції.

Ізоляція, як правило, дещо неоднорідна в нормальних умовах.

У процесі старіння ізоляції окремі діелектрики по-різному змінюють свої характеристики, тобто ступінь неоднорідності збільшується. Аналогічно поводить ізоляція при зволоженні.

Завдяки цим властивостям параметри, пов'язані з явищем поляризації можуть служити показником якості ізоляції та використовуватися для цілей контролю.

У загальному випадку, при включенні діелектрика на постійну напругу перехідний процес визначається наступними залежностями:



$$i = I_\infty + I_{a0} \cdot e^{-t/T}$$

$$T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2)$$

чи

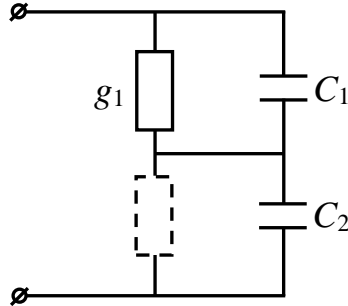
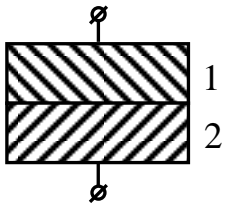
$$T = \frac{C_1 + C_2}{g_1 + g_2} \quad ,$$

де g_1, g_2 – провідності шарів.

5.2 Контроль ізоляції за опором (струмом провідності)

Припустимо, що шар 1 зволожений, тобто його провідність збільшилася. Тоді провідністю шару 2 можна знехтувати ($g_2 \ll g_1$).

Схема заміщення набуває наступного вигляду, і амплітуда струму абсорбції зростає.

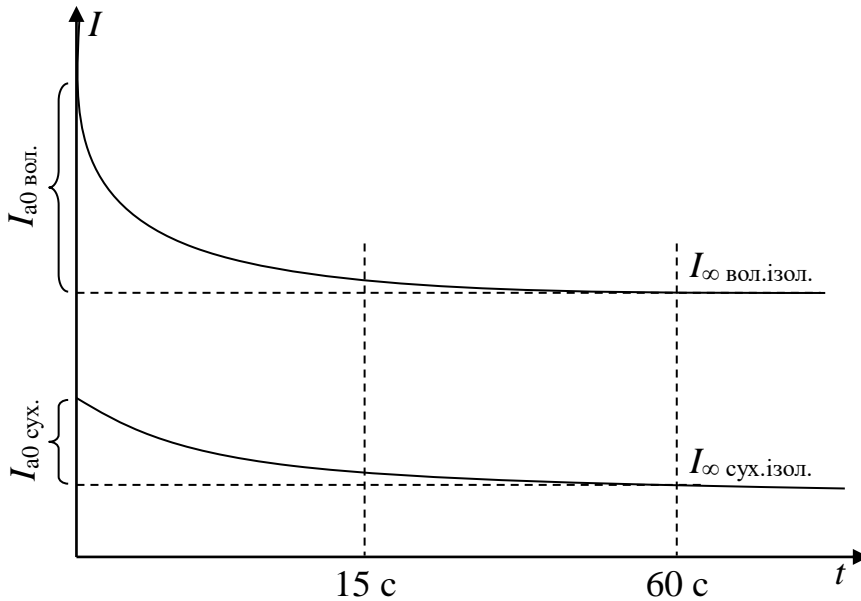


$$I_{a0} = \frac{U \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot g_1$$

Постійна часу при цьому зменшиться

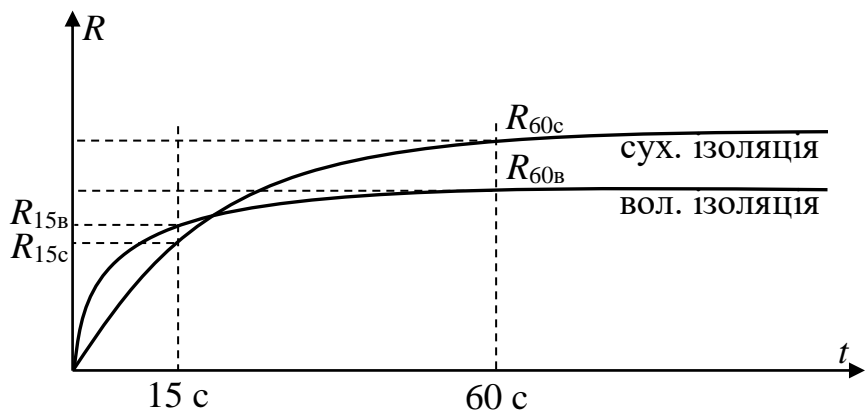
$$T = \frac{C_1 + C_2}{g_1}$$

Для більшості ізоляційних конструкцій процеси поляризації закінчуються за 60 с (300, 600). Якість ізоляції може характеризуватися поляризаційним спадом струму або відповідно наростанням опору в часі.



Крива наростання опору в часі

Опір ізоляції (показання мегометра) швидко збільшується при вологій ізоляції, так що якщо взяти два відліку – один через 15, інший – через 60 с, то відношення R_{60}/R_{15} наближається до одиниці тим ближче, чим сильніше зволожена ізоляція (для оцінки приймається $R_{60}/R_{15} > 1,2$).



Для сухої ізоляції в інтервалі 15...60 с відбувається сильна зміна показань мегомметра. R_{60}/R_{15} може досягати значень 1,2...2,5.

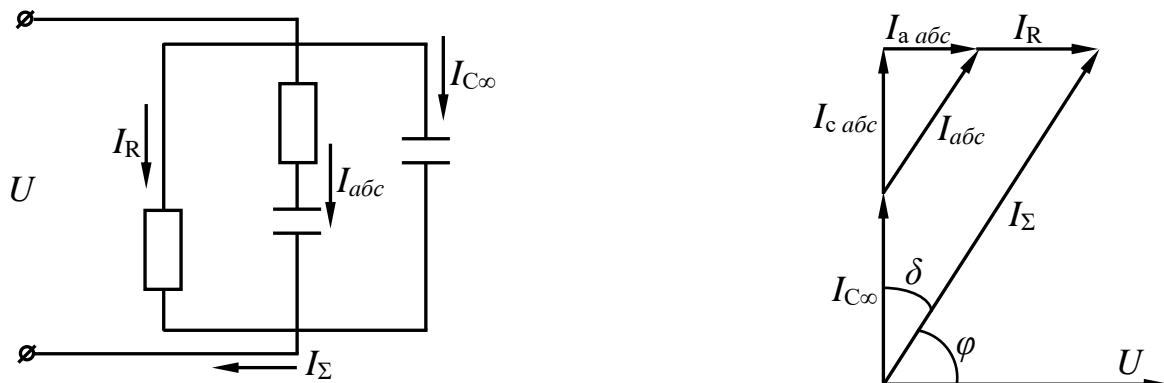
Перевагою контролю ізоляції по опорі є незалежність результатів вимірювань від об'єму ізоляції. Цей метод малоєфективний при температурі вище 35...40° С через сильне зростання струму наскрізної провідності.

При цьому відношення $R_{60}/R_{15} \rightarrow 1$ і мало залежить від зволоження ізоляції.

Для виміру опору ізоляції електроустаткування використовуються мегомметри на 500, 1000 й 2500 В.

5.3 Контроль ізоляції за діелектричними втратами

Векторна діаграма діелектрика згідно схеми заміщення має такий вигляд.



Рішення схеми заміщення дає для струму абсорбції вирази:

$$I_{a\bar{b}c} = \frac{U}{r - j \frac{1}{\omega \cdot C_a}} = U \cdot \frac{r + j \frac{1}{\omega \cdot C_a}}{r^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C_a^2}} = U \cdot \frac{r \cdot \omega^2 \cdot C_a^2 + j \omega \cdot C_a}{r^2 \cdot \omega^2 \cdot C_a^2 + 1} = U \frac{\omega^2 \cdot T \cdot C_a}{\omega^2 \cdot T^2 + 1} + U \cdot j \frac{\omega \cdot C_a}{\omega^2 \cdot T^2 + 1}$$

Повний струм через ізоляцію

$$I_{\Sigma} = U \frac{\omega^2 \cdot T \cdot C_a}{\omega^2 \cdot T^2 + 1} + \frac{U}{R} + j \left(U \frac{\omega \cdot C_a}{\omega^2 \cdot T^2 + 1} + U \cdot \omega \cdot C_{\infty} \right)$$

Вважаючи $R \approx \infty$, можна знехтувати струмом наскрізної провідності, оскільки він значно менше струму поляризації.

Враховуючи, що $T = C_a \cdot r$ та $C_a = C - C_{\infty}$ можна знайти $\text{tg} \delta$ як відношення активного струму до ємнісного.

$$\text{tg} \delta = \frac{\omega \cdot T \left(\frac{C}{C_{\infty}} - 1 \right)}{\frac{C}{C_{\infty}} + \omega^2 \cdot T^2}$$

Оскільки відношення ємностей C/C_{∞} не залежить від геометричних розмірів і постійна часу $T = C_a \cdot r$ також, метод дозволяє виявити загальне зволоження ізоляції, її неоднорідність, забруднення.

У невеликих об'єктах вимір $\text{tg} \delta$ дозволяє виявити навіть місцеві дефекти ізоляції.

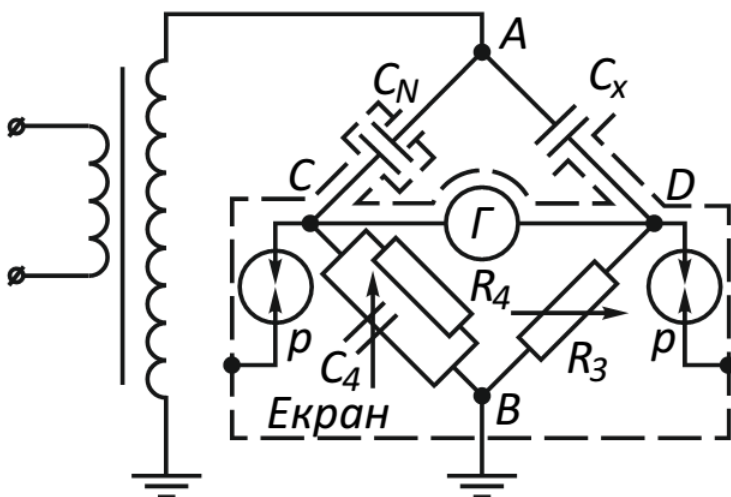
Вимірювання значення $\text{tg} \delta$ дає уявлення про якість ізоляції, а характер його зміни при періодичних вимірах дозволяє судити про погіршення властивостей ізоляції.

Величина $\text{tg} \delta$ нормується майже для всіх видів ізоляції.

Вимірювання $\text{tg} \delta$ ізоляції, а також ємності високовольтного обладнання здійснюється при експлуатації високовольтним мостом Шерінга (переносні мости типу МД-16 і Р-595).

При вимірі використовується так звана нормальна схема вимірювання, якщо жоден з електродів контрольованої ізоляції не пов'язаний з землею. У цьому випадку елементи управління моста R_4 , C_4 , R_3 , Γ знаходяться під невеликою напругою і забезпечується більша безпека оператора.

Напруга живлення мосту не перевищує 10 кВ незалежно від номінальної напруги випробуваної ізоляції. У схемі мосту міститься еталонний конденсатор, який практично не має втрат (діелектрик конденсатора – стиснений газ).

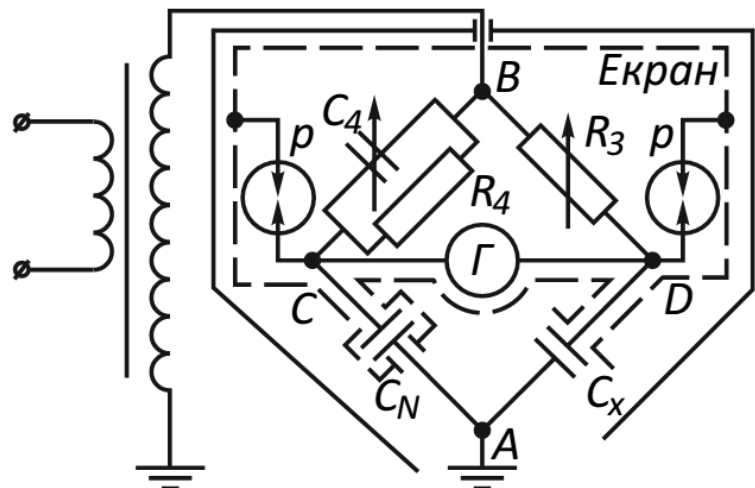


- R_3 – безіндукційний змінний резистор;
- R_4 – постійний резистор;
- C_4 – конденсатор змінної ємності;
- Γ – індикатор рівноваги мосту (вібраційний гальванометр).

Випробувана ізоляція представлена в схемі моста ємністю C_X .

Для захисту оператора від небезпеки високої напруги встановлені розрядники Р.

Якщо один з електродів ізоляції пов'язаний з землею (заземлений), застосування нормальної схеми стає неможливим. При цьому використовується так звана перевернена схема моста. Оператор при цьому повинен користуватися ізолюючими ручками, оскільки весь міст перебуває під високою напругою.



При рівновазі моста показники якості ізоляції визначаються:

$$C_X = C_N \cdot R_4 / R_3 \quad \text{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4$$

5.4 Ємнісні методи контролю ізоляції

5.4.1 Метод «ємність – частота»

Повна провідність ізоляції залежить від частоти прикладеної напруги та визначається як сума провідностей гілок.

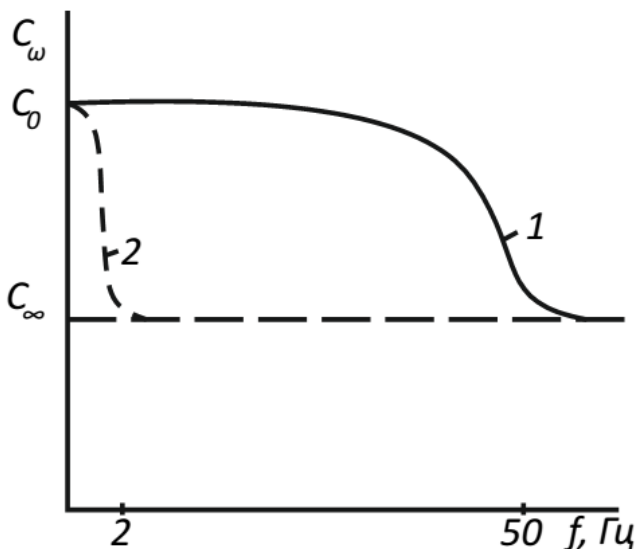
$$Y = \frac{1}{R} + j\omega \cdot C_\infty + \frac{1}{r + \frac{1}{j\omega \cdot C_a}}$$

Помноживши і розділивши останній доданок на $r - \frac{1}{j\omega \cdot C_a}$, після перетворення отримаємо:

$$Y = \frac{1}{R} + \frac{r \cdot (\omega \cdot C_a)^2}{1 + (\omega \cdot r \cdot C_a)^2} + j\omega \cdot \left[C_\infty + \frac{C_a}{1 + (\omega \cdot r \cdot C_a)^2} \right]$$

Вочевидь, вираз у квадратних дужках являє собою еквівалентну ємність ізоляції при частоті ω .

$$C_\omega = C_\infty + \frac{C_a}{1 + (\omega \cdot T)^2}$$



Оскільки постійна T залежить від ступеня зволоження ізоляції, то межі зміни ємності C_ω зі зростанням частоти виявляється тим ширше, чим більше зволоження ізоляції.

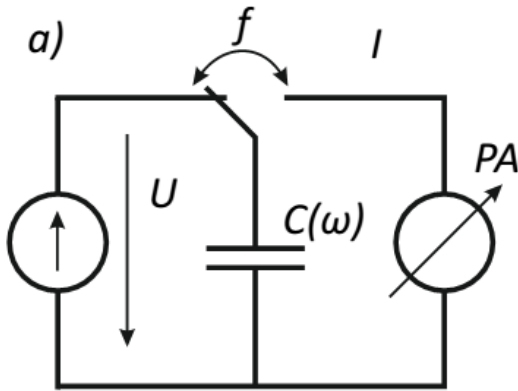
Вимірювання ємності при двох частотах f_1 і f_2 дозволяє судити про наявність в ізоляції сторонніх включень (наприклад, зволоження).

Показником якості слугує відношення ємностей C_2/C_{50} . Чим це відношення менше, тим ізоляція якісніше. Для сухої, якісної ізоляції це відношення повинне бути

$$C_2 / C_{50} \leq 1,2 \dots 1,3$$

Якщо це відношення більше, ізоляцію треба сушити. Вимірювання проводять при температурі $10 \dots 20^\circ \text{C}$ за допомогою приладу ПКВ.

Принцип дії приладу ілюструється схемою.



Випробувану ізоляцію періодично підключають до джерела постійної напруги (при цьому ємність ізоляції заряджається), а потім до гальванометра РА (ємність розряджається). Середній струм, вимірюваний гальванометром, дорівнює

$$I_f = U_0 \cdot C_\infty \cdot f$$

Вимірювання проводяться 2 рази при частотах перемикання 2 Гц і 50 Гц, тому відношення ємностей при двох вимірах дорівнює:

$$\frac{C_2}{C_{50}} = \frac{50 \cdot I_2}{2 \cdot I_{50}}$$

5.4.2 Метод «ємність–температура»

Структура сухої ізоляції більш однорідна і ємність обумовлюється в основному, процесами швидкої поляризації, тобто майже не залежить від температури.

При зволоженні ізоляції залишки лугів і кислот, розчиняючись у воді, створюють в ізоляції додаткові види поляризації (іонна, структурна і т.д.). Зі збільшенням температури розчинність зростає, збільшення поляризації призводить до зростання ємності. Постійна часу зменшується.

У підсумку, підвищення температури подібно зменшенню частоти.

Ефект залежності ємності від температури найсильніший у вологої ізоляції, тобто сухій доброякісній ізоляції відповідає відношення

$$C_{70} / C_{20} < 1,2 \dots 1,3 \quad ,$$

де C_{70} – ємність ізоляції при температурі 70° С; C_{20} – ємність ізоляції при температурі 20° С.

Вимірювання проводяться при напрузі промислової частоти.

Застосування методу «ємність–температура» обмежено невеликими установками, оскільки нагрівання і охолодження великих машин скрутні.

Всі ємнісні методи придатні, в основному, для однорідної ізоляції.

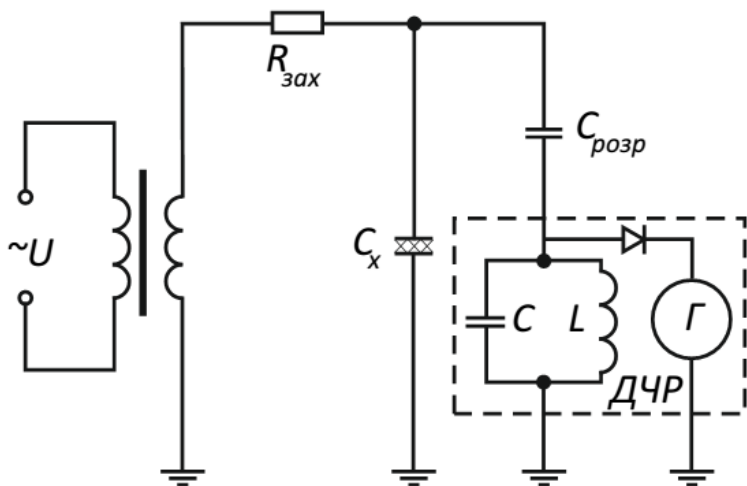
Для неоднорідної ізоляції (наприклад, ізоляції обертових машин) вони застосовуються як оціночні.

5.5 Інші методи контролю ізоляції

Нейтралізація електричного заряду при частковому розряді в ізоляції дає стрибок напруги ΔU на затискачах об'єкта випробування, під дією якого в ємності ізоляції та інших елементах кола виникає перехідний процес.

Напруги або струми перехідного процесу використовуються для вимірювання характеристик часткових розрядів в ізоляції.

Вимірювання високочастотних коливань напруги на затискачах об'єкта проводиться в тих випадках, коли немає можливості від'єднати його від землі. Для цього паралельно об'єкту через розділовий конденсатор підключається вимірювальний опір, падіння напруги з якого подається в спеціальний прилад, званий індикатором часткових розрядів.

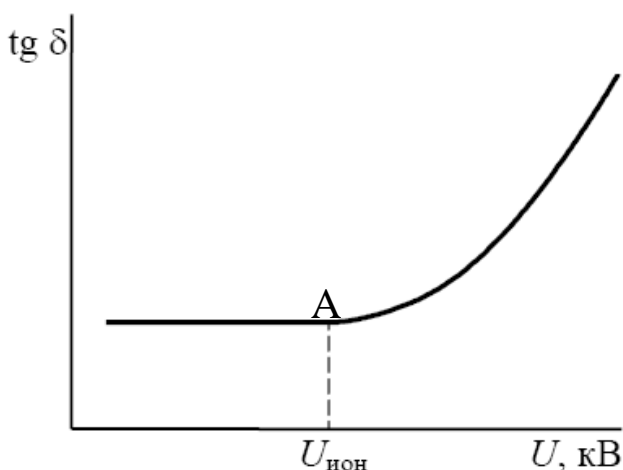


$R_{\text{ЗАХ}}$ – захисний опір;
 C_x – випробовуваний об'єкт;
 $C_{\text{РОЗР}}$ – розділова ємність;
 $L-C$ – коливальний контур;
 Γ – гальванометр.

Інший метод – *вимір імпульсів струму* в колі об'єкта застосовується лише тоді, коли вимірювальний опір можна включити послідовно з об'єктом випробування (з боку землі).

Імпульси, що надходять на вхід ДЧР підсилюються, випрямляються і вимірюються.

Проведення контролю ізоляції за інтенсивністю часткових розрядів дуже ускладнюється впливом радіоперешкод від корони на проводах та арматурі ізоляторів, індустриальних завод і ліній зв'язку.



Іонізаційні процеси в ізоляції можуть бути виявлені також шляхом зняття кривої іонізації – залежності $\text{tg}\delta = f(U)$.

A – точка іонізації, що передуює розвитку електричного розряду в ізоляції.

З інших методів слід зазначити також метод зміни розподілу напруги уздовж ізоляційної конструкції (гірлянда ізоляторів), методи просвічування, ультразвукової дефектоскопії та ін.

5.6 Випробування ізоляції підвищеною напругою

Випробування ізоляції підвищеною напругою дозволяє виявити багато дефектів, особливо зосереджені, що не виявляються іншими методами.

При цьому дефектна ізоляція пробивається. Варто мати на увазі, що прикладення надмірно високої напруги або надміру велика його витримка можуть викликати пробій навіть у справній ізоляції.

З цієї причини профілактичні й післяремонтні випробування ізоляції підвищеною напругою проводяться, по-перше, після контролю її неруйнівними методами, по-друге, значення випробувальної напруги береться на 10...15 % нижче її значення для ізоляції нового електроустаткування.

Ізоляція вважається такою, що витримала випробування, якщо не спостерігалось пробою або часткових її ушкоджень, які виявляються по виділенню газу, диму, за звуком та іншими ознаками. Випробування проводяться протягом нормованого часу (звичайно 1 хв). У деяких випадках для випробувань застосовується напруга підвищеної частоти (100, 250 Гц). Тривалість випробувань при цьому зменшується.

Істотним недоліком випробувань змінним струмом є необхідність застосування потужної випробувальної апаратури, якщо ємність об'єкта завелика (кабелі, конденсатори, великі електричні машини).

Для великих об'єктів застосовуються випробування підвищеною постійною напругою. При цьому струм, який проходить через ізоляцію, малий, втрати потужності малі і розвиток теплового пробою ускладнений. Інтенсивність часткових розрядів також мала.

Пробивна напруга на постійній напрузі значно вище, ніж на змінній. Для доброякісної ізоляції коефіцієнт зміцнення вище, ніж для дефектної.

5.7 Особливості випробувань різних ізоляційних конструкцій

5.7.1 Лінійна ізоляція

Лінійні ізолятори перевіряються періодично (раз у 3..6 років) виміром розподілу напруги по ізоляторах гірлянди.

Робота дуже трудомістка, тому впроваджуються різного роду дефектоскопи, шукачі ушкодження.

Опорні ізолятори перевіряються, так само як і лінійні, але частіше (раз на рік).

Паперово-масляні та маслобар'єрні уводи перевіряються по $\text{tg}\delta$ або одним з ємнісних методів не рідше 1 разу на рік.

Кабелі мають в основному місцеві пошкодження. Випробовуються, як правило, випрямленою напругою $5...6 U_N$ протягом 5...10 хвилин. При цьому виміряються струми витоку і знімається вольтамперна характеристика ізоляції. Визначається коефіцієнт асиметрії струмів витоку (≤ 2).

Струми витоку кабелю порівнюються з результатами попередніх випробувань.

Дефектний кабель «пропалюють» при напрузі 5...6 кВ струмом до 5 А для того, щоб зробити пробій більш явним і полегшити знаходження місця пошкодження.

5.7.2 Трансформатори

Трансформатори випробовуються не рідше, ніж через 2...3 роки, попередньо визначаються наступні параметри ізоляції: $\text{tg}\delta$, C_2/C_{50} , R_{60} , іноді C_{70}/C_{20} , R_{60}/R_{15} .

Ці параметри є основними. Вони нормовані.

Зосереджені дефекти (у вигляді провідних доріжок) виявляються випробуванням постійною напругою.

Остаточні випробування проводяться підвищеною напругою промислової частоти

$U_{\text{ВИПР}} = 0,75 U_{\text{ЗАВОДСЬКОГО}}$ – після дрібного ремонту;

$U_{\text{ВИПР}} = 0,9 U_{\text{ЗАВОДСЬКОГО}}$ – після капітального ремонту трансформатора із заміною обмоток.

5.7.3 Обертові машини

Для обертових машин здійснюють наступні види випробувань:

- $R_{60} - 1 \text{ МОм/кВ}$ при $t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$;
- R_{60}/R_{15} – нормується $> 1,3$ при $15...30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- R_{10}/R_1 – нормується $\geq 2,5$;
- $\text{tg}\delta = f(U)$ – крива іонізації дозволяє виявити розшарування мікастрічки та інші місцеві дефекти;
- випробування постійною напругою $2...2,5U_{\text{Н}}$;
- випробування змінною напругою 50 Гц $1,3...1,7U_{\text{Н}}$;
- випробування виткової ізоляції підвищеною напругою $1,15...1,3U_{\text{Н}}$.

5.8 Випробні трансформатори

Основним елементом високовольтних іспитових установок є випробні трансформатори.

Їх особливостями у порівнянні з силовими є мала потужність і обмежений час відключення.

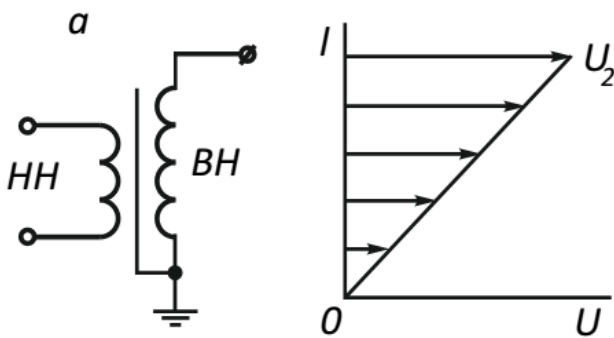
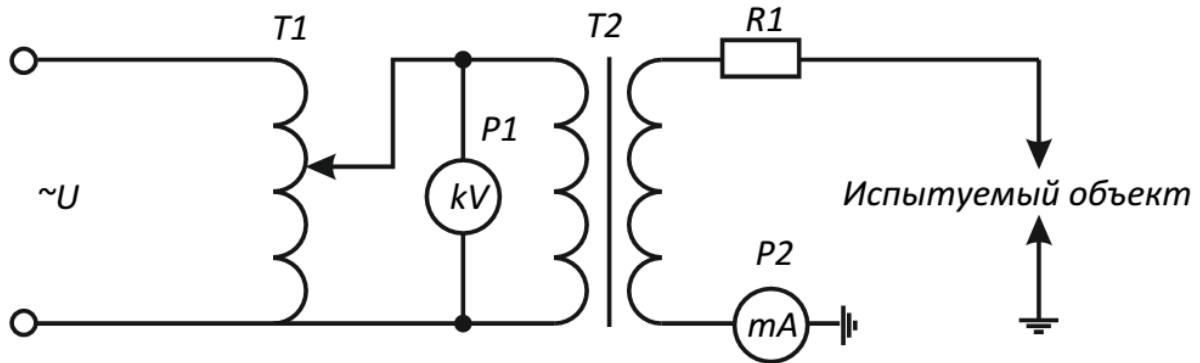
Внаслідок цього вони в більшості випадків не мають спеціальних конструктивних елементів, що служать для охолодження. Такі трансформатори не піддаються впливу перенапруг і мають малий запас електричної міцності ізоляції.

Конструктивно трансформатори виконуються:

- 1) в ізолюючому корпусі;
- 2) в металевому корпусі з одним уводом;
- 3) в металевому корпусі з двома уводами.

Трансформатори першого типу (ТВО-140), призначені для установки в закритих приміщеннях. Ізолюючий корпус являє собою циліндр з бакелізованого паперу.

Випробні трансформатори з металевим корпусом і одним вводом можуть встановлюватися як у закритих приміщеннях, так і на відкритому повітрі (ІОМ-100; ІОМ-500).



У трансформаторі з одним вводом один кінець обмотки ВН з'єднаний з корпусом і сердечником, корпус трансформатора заземлений. Потенціал розподіляється уздовж обмотки рівномірно.

Ізоляція обмотки ВН може бути виконана ступінчастою зі зменшенням її в напрямку від лінійного кінця (уводу) до заземленого. Заземлення корпуса трансформатора полегшує умови експлуатації та вимірювання.

Головний недолік трансформаторів з одним вводом – необхідність виконання ізоляції на повну напругу трансформатора.

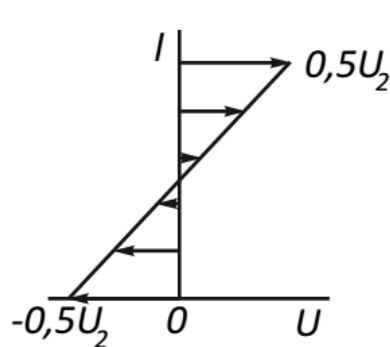
Найбільша напруга, на яку побудований трансформатор такого типу, становить 1200 кВ. Висота зовнішньої частини вводу цього трансформатора становить понад 9 м при загальній висоті трансформатора 15,5 м.

Проблема ізоляції та виводу напруги вдало вирішується в конструкціях трансформаторів з металевим баком і двома вводами.

У таких трансформаторів середня точка обмотки ВН електрично з'єднана з баком, тому вводи та ізоляція розраховуються на напругу $0,5 U_{и}$.

При звичайній схемі випробувань один з вводів заземлюється і, відтак, сердечник і корпус отримують потенціал $U_{и}/2$, що, як відомо, вимагає ізоляції корпусу від підлоги (установка на ізоляторах).

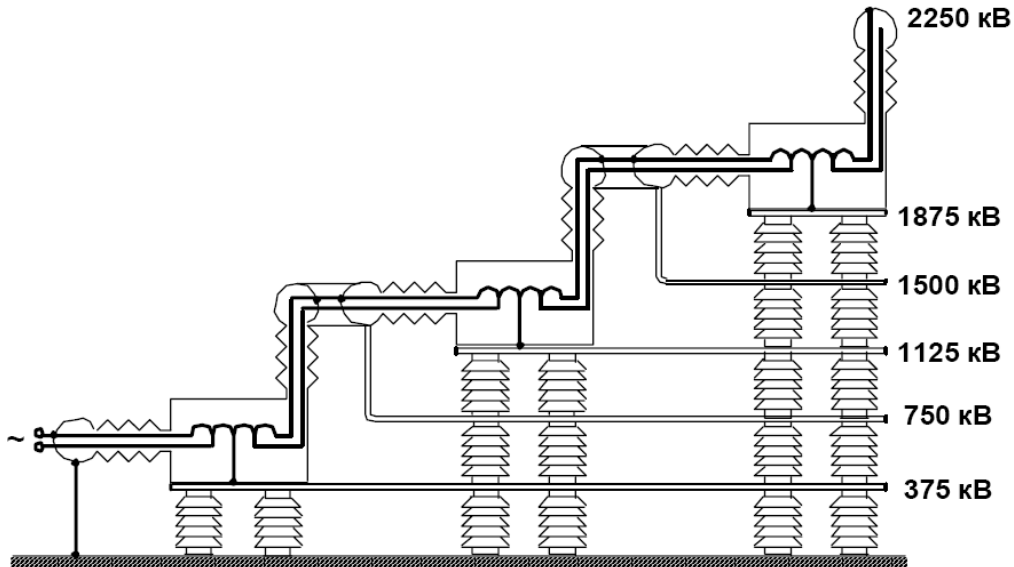
Ізоляція обмотки НН від корпусу також повинна бути виконана на половину іспитової напруги.



напруги.

Для отримання досить високих іспитових напруг застосовується каскадне включення трансформаторів, при якому обмотки ВН трансформаторів включаються послідовно, а живлення кожного наступного трансформатора здійснюється через попередній.

Опорно-ізоляційна конструкція каскаду трансформаторів має значну висоту. Для більш рівномірного розподілу напруги по конструкції на металеві рами, що зв'язують між собою опорні ізолятори подаються певні потенціали від елементів каскаду.



Потужності іспитових трансформаторів визначаються рівнями випробувальних напруг, а також тривалих струмів, що протікають по обмотках.

Струм навантаження іспитового трансформатора має чисто ємнісний характер

$$I_C = U_{\text{исп}} \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3} ,$$

де C – ємність об'єкта, що випробується, мкФ.

Сумарна ємність невеликих об'єктів має значення порядку 1000 пФ, а струм – частки ампера. При випробуваннях довгих кабелів струми досягають найбільшої величини (декілька ампер). Тому номінальна потужність іспитових трансформаторів при $U_{\text{ном}} < 250$ кВ виконується з розрахунку на струм 0,2...0,8 А, а при більших напругах – на 1А.

Іспитовий трансформатор або каскад трансформаторів приєднуються до об'єкта випробувань через захисний опір, за допомогою якого струм при розряді обмежується до номінального значення. Цей опір також зменшує крутизну зрізу напруги на уводах трансформатора.

Необхідна потужність іспитового трансформатора визначається з виразу

$$S = U_{\text{исп}}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot 10^{-3} , \text{ (кВА).}$$

Напруга змінюється за допомогою регуляторів напруги, в якості яких використовуються автотрансформатори, індуктивні регулятори і двигун-генераторні установки.

Під час випробувань швидкість підйому напруги до $1/3$ іспитової може бути довільною, допускається навіть включення вказівної напруги поштовхом. Потім напруга плавно доводиться до іспитової.

При випробуваннях внутрішньої ізоляції іспитова напруга витримується протягом 1 хв, кабельної ізоляції – 5 хв.

Ізоляція вважається витриманою, якщо не спостерігається повного розряду або її пошкоджень.

Вони встановлюються за комплексом непрямих ознак:

- потріскування;
- зміна показань приладів під час випробувань;
- зміна $\text{tg}\delta$ після випробувань і т.д.

Зовнішня ізоляція випробовується в сухому стані та під дощем методом трикратного прикладення напруги при плавному підйомі (інтервал між додатками напруги – 1 хв).

Об'єкт вважається таким, що витримав випробування, якщо не відбулося жодного повного перекриття.

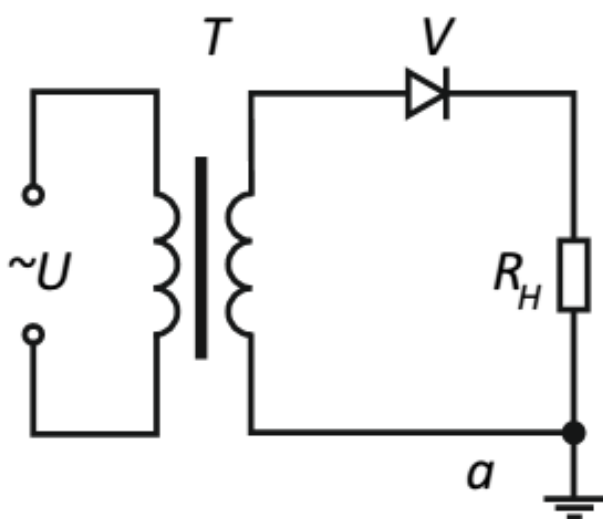
Якщо відбудеться одне перекриття (при трьох додатках), то випробування повторюється, але вже при шести додатках напруги.

При цьому вважається, що ізоляція витримала випробування, якщо не було жодного перекриття (із шести додатків напруги).

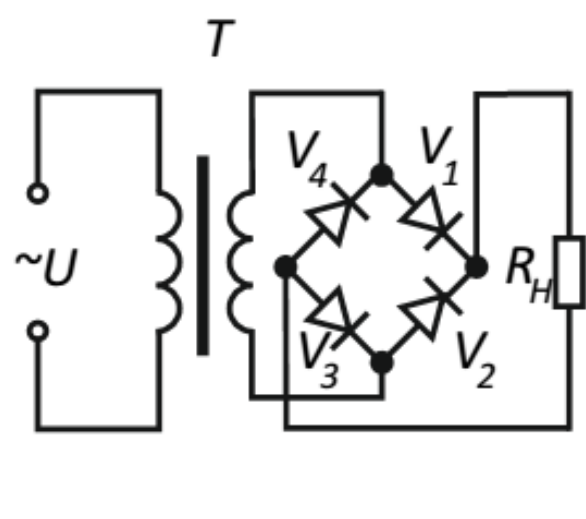
5.9 Високовольтні іспитові установки постійної напруги

Висока постійна напруга виходить зі змінної за допомогою випрямних пристроїв, у якості яких використовуються кенотрони, газотрони і напівпровідникові вентилі.

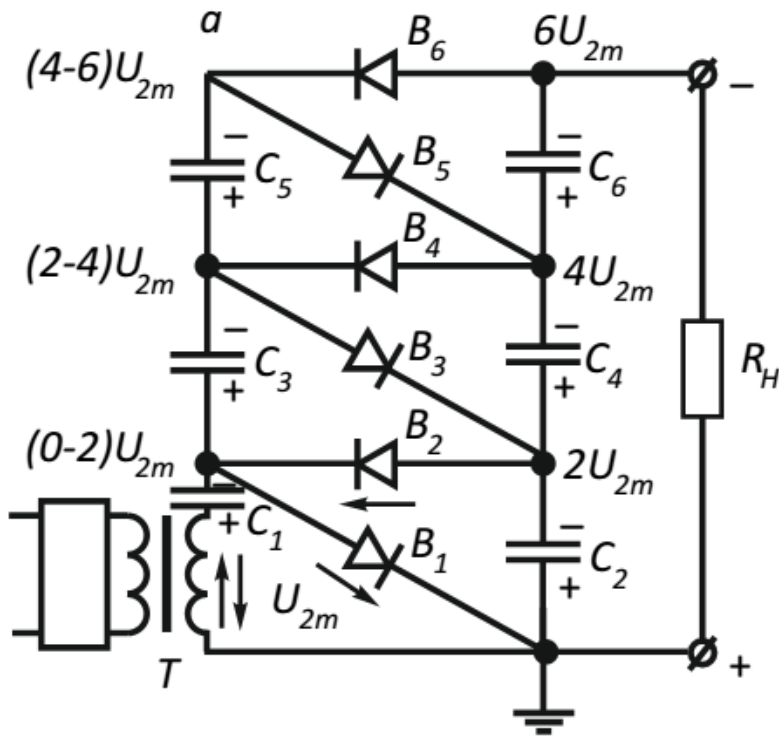
Схеми випрямлення:



однапівперіодна



дунапівперіодна мостова



В іспитових установках на напругу понад 100...200 кВ застосовують схеми множення.

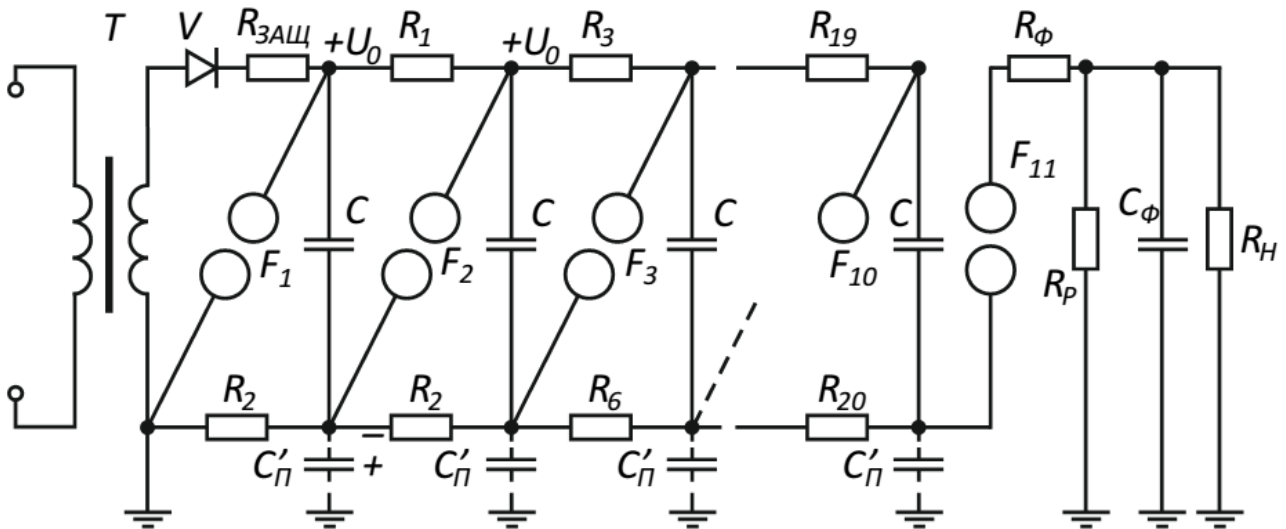
Ця схема фактично являє собою набір схем подвоєння.

На кожен наступний каскад подається пульсуюча напруга з вентиля попереднього каскаду.

5.10 Генератори імпульсних напруг

ГІН являє собою систему конденсаторів високої напруги, що працюють у режимі заряд-розряд і забезпечують при розряді високі імпульсні напруги.

Власне ГІН складається з n конденсаторів, зарядних опорів та іскрових кульових проміжків.



- T – високовольтний трансформатор; V – випрямляч;
- $R_{ЗАХ}$ – опір для обмеження зарядного струму; $R_1...R_{20}$ – зарядні опори;
- $F_1...F_{11}$ – іскрові проміжки; C – ємності ступеня ГІН;
- $C_{П}$ – «паразитні» ємності; R_{Φ} , C_{Φ} – фронтові опір і ємність;
- $R_{Р}$ – розрядний опір; $R_{Н}$ – опір навантаження

Трансформатор, випрямляч і захисний опір становлять зарядний (живильний) елемент генератора.

Розрядний і фронтовий опори, розрядна ємність складають розрядно-регулюючий елемент генератора.

Режим заряду ГН протікає в такий спосіб. Паралельно з'єднані ємності C заряджаються від джерела через великий опір $R_{ЗАХ}$. Потенціали точок стають рівними напрузі джерела. Конденсатори не пробиваються.

Режим розряду починається з пробією першого проміжку F_1 , викликаного або його зменшенням, або спеціальною схемою підпалу.

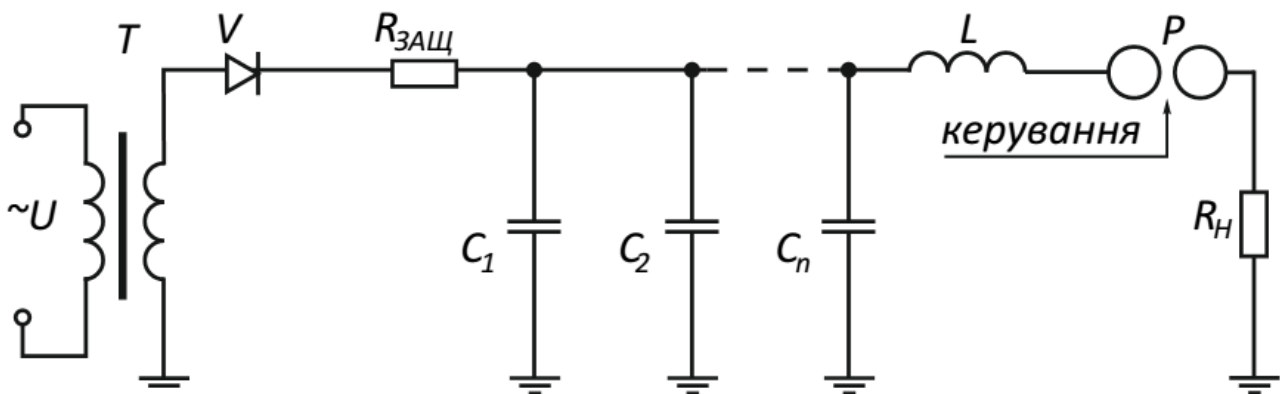
Після пробією наступна точка приймає потенціал попередньої (U_0), тобто ємність конструкції щодо землі заряджається дуже швидко. Після цього розрядник F_2 опиняється під дією напруги $2U_0$. Ця напруга більше пробивної, тому розрядник пробивається практично одночасно з пробією F_1 . Ємність C_{II} швидко розряджається. Також швидко заряджається наступна ємність C і створюються умови для подальшого пробією.

Процес почергового автоматичного спрацьовування іскрових проміжків забезпечує швидкий перехід з паралельного з'єднання конденсаторів на послідовне. В результаті такого перемикавання напруги окремих конденсаторів підсумовуються, і на іспитовому об'єкті виникає напруга, близька до $n \cdot U_0$.

Таким чином, порівняно невеликі напруги окремих конденсаторів дозволяють отримати на виході ГН напругу в кілька мільйонів вольт.

5.11 Генератор імпульсних струмів

Генератор імпульсних струмів (ГІС) являє собою систему паралельно з'єднаних високовольтних конденсаторів, що працюють у режимі заряд-розряд.



Паралельне з'єднання конденсаторів при розряді між собою (тобто всього 1 ступінь напруги) обмежує напругу на виході ГІС робочою напругою конденсаторів (100...200 кВ).

Конденсатори заряджаються від трансформатора через випрямляч, а розряджаються на випробуваний об'єкт через розрядник при подачі на нього імпульсу, що підпалює. У розрядне коло генератора включений додатковий опір для отримання аперіодичного розряду.

Конструкція ГІС, що складається з 18 конденсаторів по 1 мкФ з робочою напругою 100 кВ, забезпечує при коливальному розряді струм 500 кА, при аперіодичному – 200 кА.

5.12 Високовольтні виміри

Для виміру високих напруг застосовується 3 групи пристроїв:

- вимірювальні розрядники;
- електростатичні вольтметри;
- низьковольтні вимірювачі (осцилографи) з дільниками напруги.

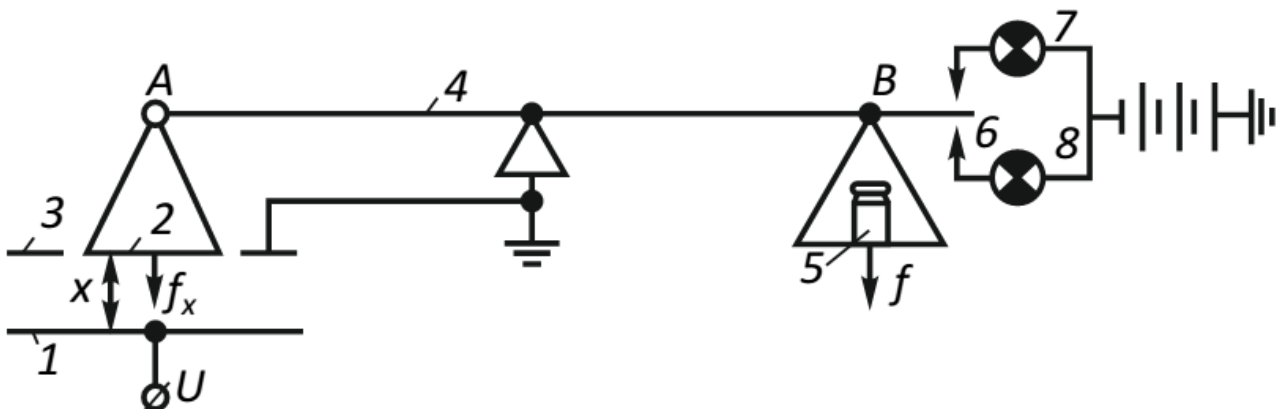
В якості вимірювальних розрядників застосовуються кульові повітряні проміжки з регульованою міжелектродною відстанню. При правильно обраних параметрах розрядника прилад забезпечує достатню точність і стабільність результатів. Такий прилад надзвичайно простий, має мізерно мале споживання, працює при будь-якій формі імпульсів, тому в ряді випадків є єдино можливим приладом.

Розрядна напруга, що відповідає відстані, при якій відбувся розряд, знаходиться з таблиць в амплітудних значеннях.

Електростатичні вольтметри засновані на взаємодії електричних зарядів (заряджених вимірюваною напругою тіл).

Прилади можуть бути засновані на вимірі сил взаємодії та обчисленні напруги (абсолютні вольтметри), або на порівнянні показань (відхилень рухомої частини) з показаннями інших приладів (відносні вольтметри).

Як приклад можна розглянути абсолютний вольтметр Чебишева, який представляє свого роду рівноважені перед вимірюванням напруги ваги.



На кінці *A* заземленого коромисла *4* підвішений плаский електрод *2* (диск). Силами f_x електростатичної взаємодії він притягується до нерухомого диску *1*, який знаходиться під вимірюваною напругою U . Завдяки наявності охоронного кільця *3*, що охоплює диск *2* і усуває тим самим крайовий ефект на його периферії, поле поміж дисками *1* та *2* строго однорідне і ємність між електродами може бути точно розрахована за формулою $C = \epsilon \cdot F / x$, де F – площа диска *2*; x – відстань між дисками.

Сила f_x визначається дослідним шляхом – врівноваженням ваг гирьками 5. Рівноважне положення контролюється за допомогою контактної системи 6 та лампочок 7 і 8.

Абсолютні вольтметри служать для виміру напруг до 300...400 кВ. З метою зменшення габаритів їх зазвичай розміщують в баку з підвищеним тиском газу (12 атм). Похибка вольтметрів при вимірах становить 0,01...0,4 %, тому вони застосовуються в якості еталонних приладів при градуюванні технічних вольтметрів високої напруги.

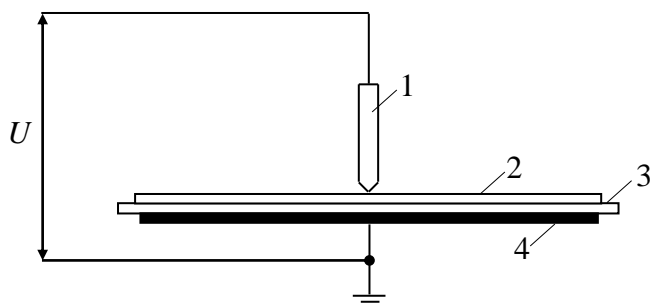
Аналогічно працює кульовий електростатичний вольтметр на V-подібних підвісках, однак точність його значно нижче.

Найбільш підходящим для виміру амплітуди змінних, постійних та імпульсних напруг, як з конструктивного боку, так і з точки зору отримання мінімальної похибки, є *кульовий розрядник*. Він може бути проградуований відразу в кіловольтах.

Розглянуті вище прилади відносяться до лабораторного устаткування. Прилади електростатичної системи засновані на тому ж принципі. Сили взаємодії врівноважуються пружиною або електродинамічною системою. Такі прилади випускаються на напругу до 110 кВ, мають точність до 1,5 %.

Миттєві значення напруги виміряються за допомогою клідонографів, електронних вольтметрів і електронних осцилографів (з дільниками напруги).

Клідонограф являє собою прилад для автоматичної реєстрації амплітуди напруги за допомогою фоточутливої пластинки.



Дія клідонографа заснована на фотографуванні поверхневого розряду, що з'являється поміж електродами 1 й 4 при подачі на них високої напруги.

Для цієї мети між електродами поміщається фотопластинка 2, звернена емульсією до загостреного кінця. Фігури поверхневого розряду з'являються на ній в результаті іонізації та рекомбінації іонів, а також електронного бомбардування солей срібла в фоточутливій емульсії. Ці фігури зветься фігурами Ліхтенберга.

Клідонограф попередньо градується: знімається крива залежності радіуса фігури від амплітуди прикладеної напруги.

Прості та дешеві клідонографи використовуються найчастіше як реєструючі прилади.

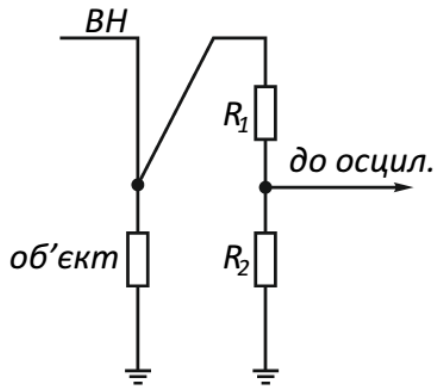
Генеруючі вольтметри можуть бути роторні або вібраційні.

Роторний вольтметр являє собою генератор постійного струму, ротор якого обертається не в магнітному, а в електричному полі.

Межі виміру легко розширювати аж до 1...2 МВ. Прилади універсальні, шкала рівномірна.

5.13 Дільники напруги

Дільники напруги знаходять широке застосування при вимірюванні високих напруг, оскільки прилади для безпосереднього виміру напруги порядку сотень кіловольт виходять громіздкими та дорогими.



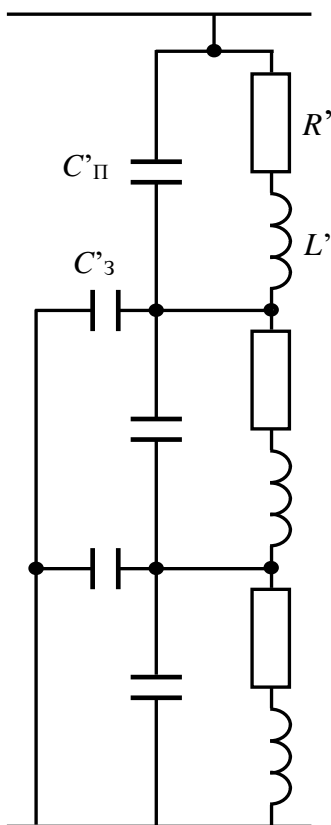
Дільники напруги є невід'ємними в схемах осцилографування.

Коефіцієнт розподілу дільника – це відношення напруги на його виході та вході.

$$K = U_1/U_2$$

Включений дільник не повинен впливати на амплітуду і форму вимірюваної напруги.

Активні дільники застосовуються для виміру високих постійних і змінних, а також імпульсних напруг. Зазвичай опір дільника вибирається таким, щоб струм через нього знаходився в межах від десятків до одиниць міліампер. Активні дільники вносять спотворення форми напруги через ємнісні струми на землю. Індуктивність дільника згладжує вплив на фронт хвиль.



У схему заміщення активного дільника введені позначення:

R' – активний опір елемента дільника;

L – індуктивність елемента;

$C'_з$ – ємність елемента відносно землі;

$C'_п$ – повздовжня ємність (ємність одного елемента дільника).

У схемі заміщення *ємнісного дільника* до власної ємності кожного елемента, яка вважається безіндукційною, додаються ємності $C'_з$ та $C'_п$.

Ці ємності та індуктивності можуть привести до виникнення паразитних коливань, які накладаються на процес, що осцилографується. Щоб зменшити вплив ємності $C'_з$ необхідно компенсувати струми, що проходять через ємності на землю.

Для цієї мети використовується екранування дільника (наприклад, влаштовується дзвіноподібний екран з боку ВН).

При напрузі > 100 кВ і підвищеній частоті похибки дільників різко зростають, а сам дільник значно ускладнюється.

При досить високих напругах в зв'язку із цим застосовують ємнісні та комбіновані дільники напруги.

Важливою перевагою ємнісного дільника є незалежність коефіцієнта розподілу від частоти.

Нерівномірність розподілу напруги по довжині (сталість коефіцієнта розподілу) вирівнюється за допомогою екранів і паралельно включених ємностей.

6 Хвильові процеси в ЛЕП

Хвильовий процес на лінії створюється при будь-якому електромагнітному збуренні, наприклад, включення лінії на джерело напруги, відключення лінії, коротке замикання, ураження лінії грозовим розрядом.

Електромагнітне збурення в будь-якій точці викликає рух хвиль від цієї точки в обох напрямках.

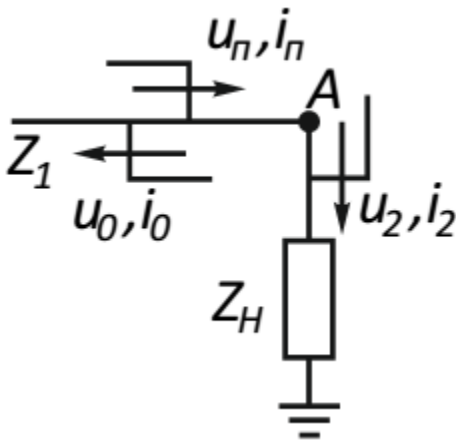
У реальних лініях хвильовий процес супроводжується втратами енергії на нагрів провідників і корону. Однак у практичних розрахунках цими втратами часто нехтують.

Перенапруги короточасні, вони еквівалентні синусоїдам високої частоти. ЛЕП для таких синусоїд доцільно розглядати як кола з розподіленими параметрами.

Лінії і навіть їхні ділянки довжиною в сотні метрів вже є довгими для розглянутих у нашому курсі перенапруг, тому першорядного значення набувають індуктивність та ємність лінії. Меншу роль має активний опір і активні витoki в лінії.

6.1 Заломлення і відбиття хвиль

Нехай електромагнітна хвиля, що рухається по лінії, набігає на вузол A , до якого підключене навантаження Z_H .



Падіння хвилі на вузол призведе до її заломлення та відбиття внаслідок зміни співвідношення між напругою і струмом.

В даному випадку пряму хвилю u_π ; i_π називають падаючою, зворотну хвилю u_0 ; i_0 – відбитою, а u_2 ; i_2 – заломлюваною.

Напруга і струм хвилі пов'язані між собою хвильовим опором лінії

$$Z = \frac{u_\pi}{i_\pi} = \frac{u_0}{i_0} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Для однопровідної повітряної лінії хвильовий опір

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{r} = 138 \cdot \lg \frac{2 \cdot h}{r} \quad ,$$

де h та r – середня висота підвісу і радіус проводу.

$Z = 400 \dots 500 \text{ Ом}$ – для повітряних ЛЕП з одиночними проводами.
 $Z = 350 \dots 400 \text{ Ом}$ – для повітряних ЛЕП з розщепленими проводами.
 $Z = 10 \dots 150 \text{ Ом}$ – для кабельних ліній.

Швидкість поширення хвилі

$$v = 1/\sqrt{L_0 \cdot C_0}$$

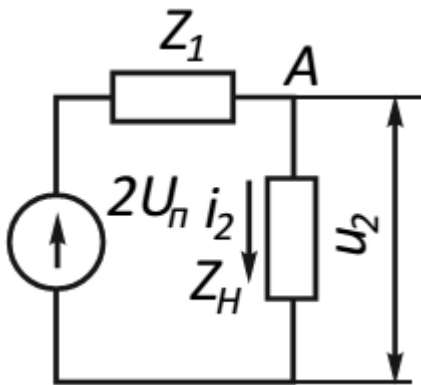
Схема заміщення (схема Петерсена).

Напруга і струм у навантаженні (заломлена хвиля) вочевидь, дорівнюють

$$u_2 = u_{\Pi} + u_0 \quad , \quad i_2 = i_{\Pi} + i_0$$

Підставивши значення струмів $i_{\Pi} = u_{\Pi} / Z_1$ та $i_0 = -u_0 / Z_1$ (знак хвилі відбитого струму завжди протилежний знаку хвилі відбитої напруги) отримаємо

$$i_2 \cdot Z_1 = u_{\Pi} - u_2 + u_{\Pi} \quad , \quad \text{тобто} \quad 2 \cdot u_{\Pi} = i_2 \cdot Z_1 + u_2$$



Це рівняння справедливо для будь-якої точки лінії, йому відповідає наступна розрахункова схема (схема Петерсена).

На задане джерело напруги $2 \cdot u_{\Pi}$ включаються послідовно з'єднані активний опір Z_1 та навантаження Z_H .

Користуючись схемою заміщення можна значно спростити розрахунки, виконуючи їх за правилами кіл із зосередженими параметрами.

Розв'язуючи схему заміщення, знайдемо

$$u_2 = i_2 \cdot Z_H = \frac{2 \cdot u_{\Pi}}{Z_1 + Z_H} \cdot Z_H = u_{\Pi} \cdot \alpha$$

$$u_0 = u_2 - u_{\Pi} = u_{\Pi} \cdot \frac{Z_H - Z_1}{Z_1 + Z_H} = u_{\Pi} \cdot \beta$$

де

$$\alpha = \frac{2 \cdot Z_H}{Z_1 + Z_H} \text{ – коефіцієнт заломлення,}$$

$$\beta = \frac{Z_H - Z_1}{Z_1 + Z_H} \text{ – коефіцієнт відбиття.}$$

У загальному випадку коефіцієнти α і β комплексні числа, при активному навантаженні – дійсні.

Так, наприклад,

– для розімкнутої лінії $Z_H = \infty$

$$\alpha = 2 \quad , \quad \beta = \alpha - 1 = 1 \quad ,$$

тобто хвиля напруги відбивається зі збереженням знака, а хвиля струму, відповідно, зі змінної знака. В результаті напруга на навантаженні (на розімкнутому кінці лінії) подвоюється, а струм спадає до нуля;

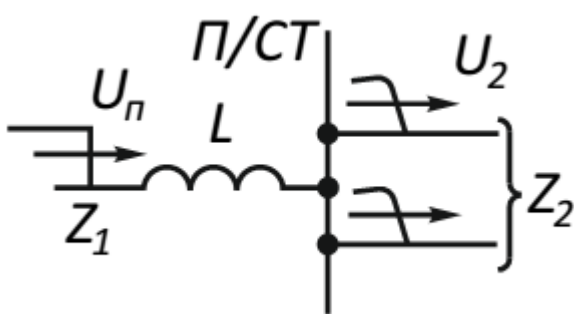
– для короткозамкненої лінії $Z_H = 0$

$$\alpha = 0 \quad , \quad \beta = \alpha - 1 = -1 \quad ,$$

хвиля напруги на кінці лінії відбивається зі зміною знака, а хвиля струму – зі збереженням. В результаті такого відображення напруга в короткозамкненій лінії спадає до нуля, а струм подвоюється.

6.2 Проходження хвиль через індуктивності та ємності

Розглянемо задачу 1: прямокутна хвиля u_{Π} набігає на підстанцію, від шин якої живиться кілька ліній. Визначити напругу на шинах, якщо у розсічення лінії живлення включена індуктивність L .



розрахункова схема

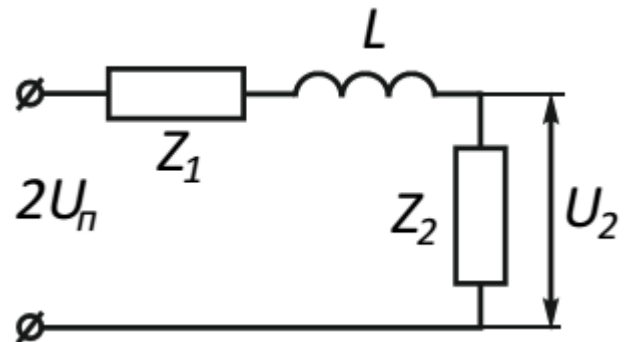


схема заміщення

Z_2 – еквівалентний опір ліній, що відходять.

Напругу на навантаженні u_2 можна отримати, вирішивши задачу перехідного процесу в схемі заміщення.

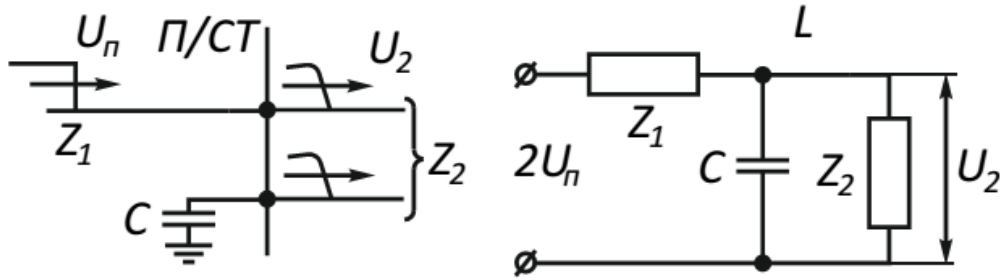
$$u_2(t) = 2 \cdot U_{\Pi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-t/T_L}) = U_{\Pi} \cdot \alpha \cdot (1 - e^{-t/T_L}) \quad ,$$

де $T_L = L / (Z_1 + Z_2)$ – постійна часу.

Висновок: індуктивність згладжує фронт хвилі, яка проходить через неї, відповідно до постійної часу T .

Приклад: Індуктивність реакторів, що включаються поміж лінією і шинами підстанції, зазвичай складає 2...5 мГн. Тоді для прохідної п/ст з повітряними лініями $T_L = 2...5$ мкс, в разі кабельних ліній постійна часу зростає в десятки разів до 20...100 мкс. Для тупикових підстанцій, коли $Z_2 = \infty$, $T_L = 0$, тобто ніякого ефекту, який згладжує фронт хвилі, реактор чинити не буде.

Задача 2: та ж хвиля набігає на п/ст, до шин якої підключена ємність.



Аналогічне рішення дає наступний вираз для напруги

$$u_2(t) = 2 \cdot U_{\Pi} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot (1 - e^{-t/T_C}) = U_{\Pi} \cdot \alpha \cdot (1 - e^{-t/T_C}) ,$$

де $T_C = C \cdot Z_1 \cdot Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ – постійна часу.

Ємність шин підстанції при відсутності спеціально включених конденсаторів зазвичай становить $(1...5) \cdot 10^{-3}$ мкФ. Тоді для тупикових п/ст з повітряною лінією $T_C = (1...5) \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 0,5...2,5$ мкс, в разі кабельної лінії постійна часу буде в десятки разів менше. При наявності ліній, що відходять, вона зменшується в міру збільшення їх числа (для прохідної підстанції, коли $Z_1 = Z_2$ – удвічі). Отже згладжувальний вплив ємності самої п/ст. незначний.

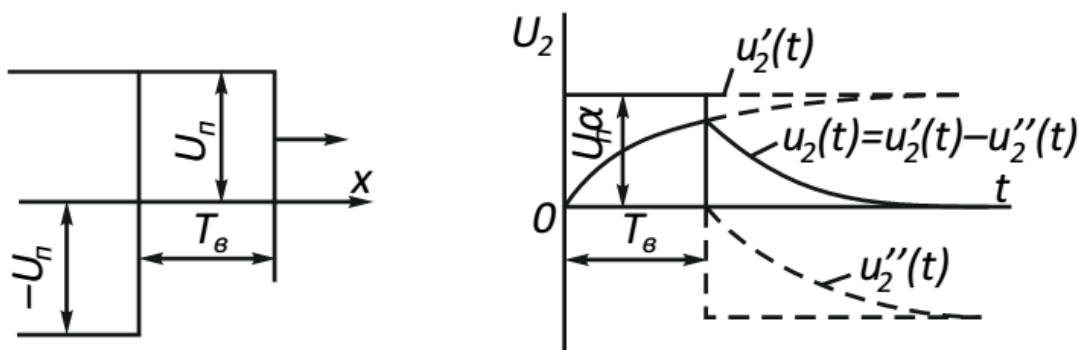
Включення додаткових конденсаторів $0,5...1$ мкФ підвищує постійну часу при повітряних лініях до $250...500$ мкс, а при кабельних до $10...20$ мкс.

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що ємності та індуктивності можуть значно згладжувати крутість фронту прямолінійних хвиль. На підстанції з повітряними лініями особливо ефективно застосування конденсаторів, а з кабельними – реакторів.

Набагато більший ефект роблять ємність та індуктивність при набіганні коротких хвиль. В цьому випадку змінюється не тільки крутість, але й амплітуда хвиль, що проходять у навантаження.

Для того, щоб скористатися схемою заміщення падаюча хвиля кінцевої довжини представляється накладенням двох нескінченних хвиль різного знаку, зсунутих на відстань T_B . Відповідно і заломлена хвиля буде визначатися сумою складових, обчислених для нескінченних хвиль. Максимум заломленої хвилі настає при $t = T_B$, тобто

$$U_{2\text{MAX}} \approx U_{\Pi} \cdot \alpha \cdot (1 - e^{-T_B/T})$$



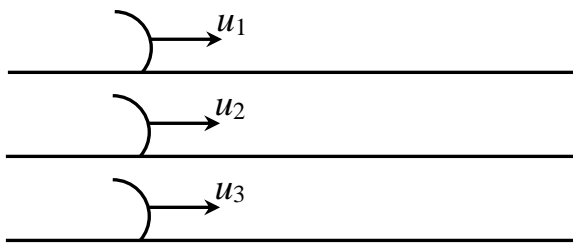
З цього виразу випливає, що ємність або індуктивність може помітно знизити амплітуду заломленої хвилі в тому разі, якщо довжина хвилі T_B значно менше постійної часу T . У цьому випадку

$$1 - e^{-T_B/T} \approx 1 - T_B/T$$

$$U_{2\text{MAX}} \approx U_{\text{П}} \cdot \alpha \cdot (1 - T_B/T)$$

6.3 Хвильові процеси в багатопровідній лінії без втрат

Електромагнітні хвилі в багатопровідній системі (паралельні лінії) без втрат поширюються, як і в однопровідній лінії без спотворення та загасання. В силу плоского характеру поля потенціал будь-якого з проводів визначається зарядами, зосередженими в даному перетині на усіх проводах системи.



Зв'язок між потенціалами і струмами залежить від параметрів лінії та може бути виражений через рівняння Максвелла.

$$\begin{cases} u_1 = \alpha_{11} \cdot q_1 + \alpha_{12} \cdot q_2 \\ u_2 = \alpha_{21} \cdot q_1 + \alpha_{22} \cdot q_2 \end{cases}$$

де α_{11} – потенційний коефіцієнт, що зв'язує потенціал 1-го проводу з його зарядом; α_{12} – потенційний коефіцієнт, що зв'язує потенціал 1-го проводу з зарядом 2-го.

Розділивши і помноживши обидва рівняння на швидкість

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\alpha_{11}}{v} \cdot q_1 \cdot v + \frac{\alpha_{12}}{v} \cdot q_2 \cdot v \\ u_2 = \frac{\alpha_{21}}{v} \cdot q_1 \cdot v + \frac{\alpha_{22}}{v} \cdot q_2 \cdot v \end{cases}$$

Оскільки

$$q_1 \cdot v = i_1, \quad \text{а} \quad q_2 \cdot v = i_2$$

та позначивши

$$\alpha_{12} / v = Z_{12}, \quad \alpha_{12} / v = Z_{12} \quad \text{і т.д.}$$

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11} \cdot i_1 + Z_{12} \cdot i_2 \\ u_2 = Z_{21} \cdot i_1 + Z_{22} \cdot i_2 \end{cases}$$

поклавши $i_2 = 0$, отримаємо

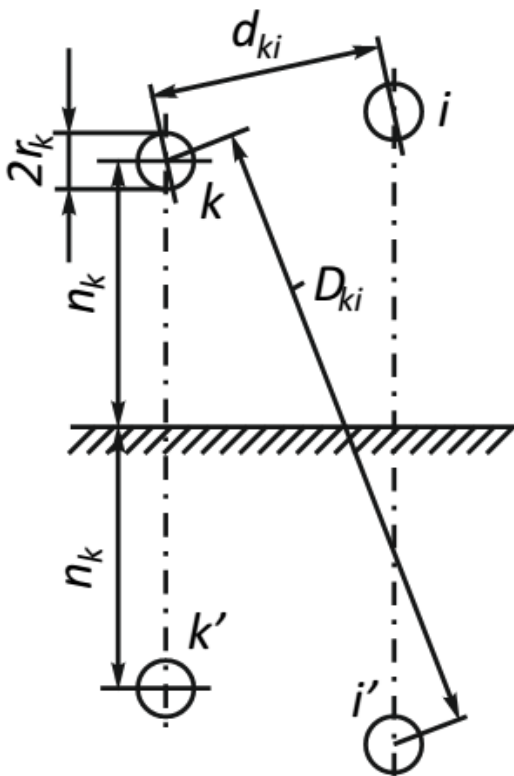
$Z_{11} = u_1 / i_1$ – власний хвильовий опір 1-го проводу;

$Z_{21} = u_2 / i_1$ – взаємний опір двох проводів.

Аналогічно визначається Z_{22} та Z_{12} , причому $Z_{12} = Z_{21}$.

В загальному випадку

$Z_{ki} = u_k / i_i$ – відношення потенціалу проводу k до струму в проводі i , який наводить цей потенціал.



Для повітряних ліній

$$Z_{kk} = 138 \cdot \lg 2 \cdot h_k / r_k$$

$$Z_{ki} = 138 \cdot \lg D_{ki} / d_{ki}$$

k, i – проводи;

k', i' – дзеркальне зображення проводів.

Чисельні значення взаємних хвильових опорів на повітряних ЛЕП зазвичай знаходяться в межах 100...200 Ом.

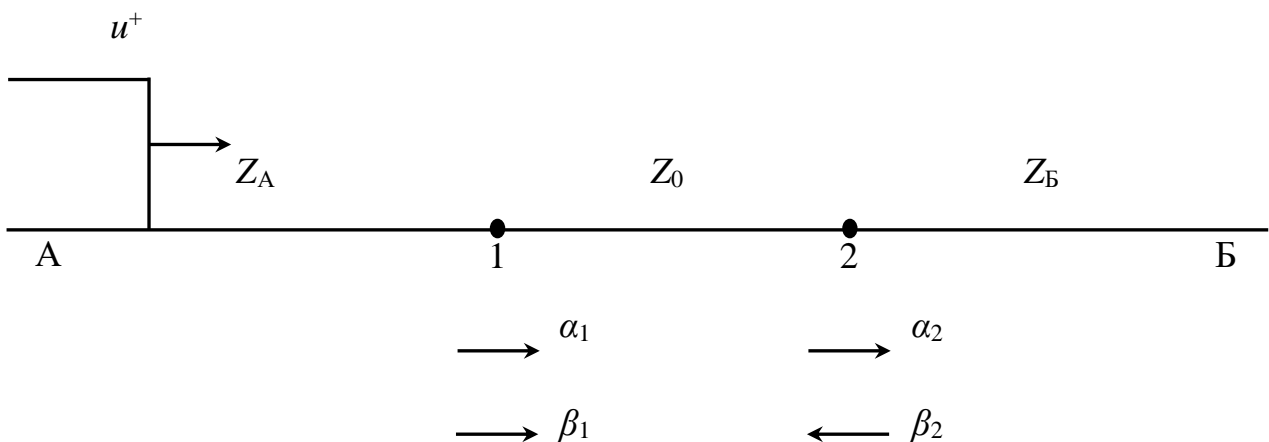
Значення Z_{21} / Z_{11} називається *геометричним коефіцієнтом зв'язку* між проводами 1 і 2. Він показує відношення напруги на ізолюваному проводі 2 до напруги індукованої хвилі на проводі 1.

Коефіцієнт зв'язку двох проводів тим більше, чим менше відстань між проводами (при цьому зростає взаємний хвильовий опір). Для ліній електропередачі його значення зазвичай лежать в межах 0,2...0,3.

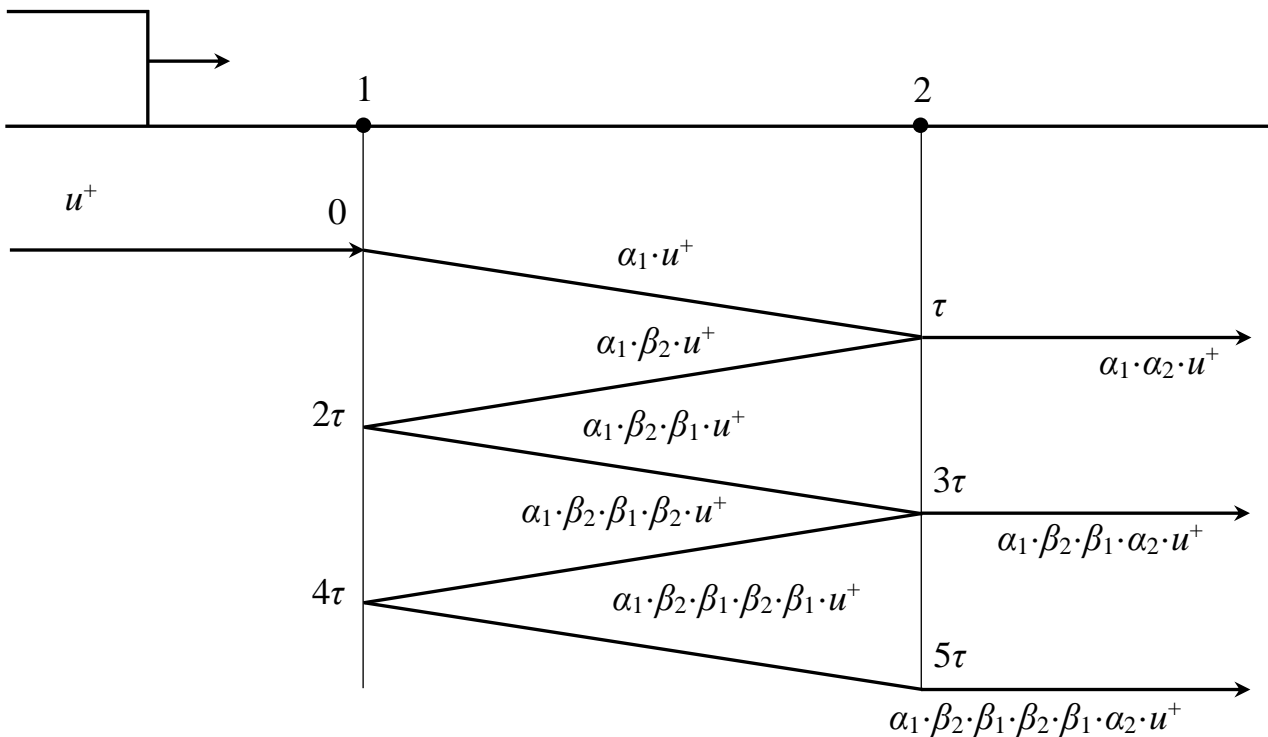
З точки зору полегшення умов роботи ізоляції повітряних ліній бажано мати великі значення коефіцієнтів зв'язку.

6.4 Багаторазові відбиття хвиль

Якщо на шляху поширення хвилі зустрічається ділянка лінії, хвильовий опір якої відрізняється від хвильового опору попередньої та подальшої ділянок (є 2 вузли – 1 і 2), то на ділянці 1-2 хвиля буде зазнавати багаторазові відбиття.



Процес багаторазового відбиття зручно представити характеристичною сіткою.



Розрахунок зручно робити для дискретних моментів часу з інтервалом $\Delta t = 2 \cdot \tau$, де $\tau = l / v$ – час пробігу хвилі по ділянці 1-2.

На границі після нескінченного числа відбиттів напруга в лінії Б представлятиме суму заломлених хвиль

$$U_{B\infty} = u^+ \cdot \frac{2 \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = u^+ \cdot \alpha_{AB}$$

Характер перехідного процесу визначається співвідношеннями між хвильовими опорами всіх трьох ділянок Z_A , Z_B , Z_0 .

1 випадок

$Z_A > Z_B < Z_0$ (кабельна вставка в повітряній ЛЕП)

$$\beta_1 = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} > 0 \quad \beta_2 = \frac{Z_0 - Z_B}{Z_0 + Z_B} > 0$$

Оскільки $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$, то можна зробити висновок, що $C_{0B} < C_{0A} > C_0$, тобто кабельну вставку можна замінити зосередженою ємністю C .

Величину цієї ємності можна визначити, скориставшись наступними міркуваннями.

На підставі згаданого виразу одержуємо $C_0 = L_0 / Z^2$, а з виразу $v = 1 / \sqrt{L_0 \cdot C_0}$ одержуємо $L_0 = \frac{1}{v^2} \cdot C_0$.

Підставляючи значення L_0 в формулу для C_0 , маємо:

$$C_0 = \frac{1}{v^2 \cdot C_0 \cdot Z^2} \quad C_0^2 = \frac{1}{v^2 \cdot Z^2} \quad C_0 = \frac{1}{v \cdot Z}$$

Ємність всієї вставки

$$C = l \cdot C_0 = \frac{l}{v \cdot Z} = \frac{\tau}{Z} \quad C = \frac{\tau}{Z} ,$$

де τ – час пробігу хвилі по кабельній вставці.

2 випадок

$Z_A < Z_B > Z_B$ (вставка з більшим хвильовим опором)

Очевидно, що таку вставку доцільно замінити зосередженою індуктивністю. Міркуючи аналогічно 1 випадку:

$$\text{з } Z = \sqrt{L_0 / C_0} \text{ отримуємо } L_0 = Z^2 \cdot C_0 ,$$

$$\text{а з } v = 1 / \sqrt{L_0 \cdot C_0} \text{ отримуємо } C_0 = 1 / v^2 \cdot L_0 .$$

Підставляючи значення C_0 у вираз для L_0 , маємо:

$$L_0 = \frac{1 \cdot Z^2}{v^2 \cdot L_0} \quad L_0^2 = \frac{Z^2}{v^2} \quad L_0 = \frac{Z}{v}$$

Індуктивність всієї вставки:

$$L = l \cdot L_0 = \frac{l \cdot Z}{v} = \tau \cdot Z \quad L = \tau \cdot Z$$

3 випадок

$Z_A > Z_B > Z_B$

$$\beta_1 = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} > 0 \quad \beta_2 = \frac{Z_B - Z_B}{Z_B + Z_B} < 0$$

Добуток коефіцієнтів відбиття $\beta_1 \cdot \beta_2 < 0$.

Процес має коливальний характер і може бути замінений схемою із зосередженими параметрами у вигляді коливального контуру.

6.5 Багаторазові відбиття хвиль довільної форми

Хвилю довільної форми зручно представити низкою дискретних значень (через дискретні проміжки часу з інтервалом Δt). Величину інтервалу приймають кратною 2τ , де τ – час пробігу хвилі по вставці.

Приклад:

$$Z_A = Z_B = 450 \text{ Ом}$$

$$Z_B = 150 \text{ Ом}$$

$$l = 30 \text{ м}$$

Час пробігу хвилі $\tau = l / v = 30 / 150 = 0,2 \text{ мкс}$.

Приймаємо $\Delta t = 2\tau$.

Задаємо криву напруги в табличній формі

t	мкс	0	0,4	0,8	1,2	1,6
U	кВ	0	200	400	500	500

Коефіцієнти:

$$\alpha_A = \frac{2 \cdot Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{2 \cdot 150}{450 + 150} = 0,5$$

$$\alpha_B = \frac{2 \cdot Z_A}{Z_B + Z_A} = \frac{2 \cdot 450}{150 + 450} = 1,5$$

$$\beta_A = \beta_B = \frac{Z_A - Z_B}{Z_A + Z_B} = \frac{450 - 150}{450 + 150} = 0,5$$

Рішення задачі виконуємо за допомогою характеристичної сітки.

Крок	$t_1 = k \cdot \Delta t$	$U(t)$	ΔU_1			ΔU_2	U_2	t_2
0	0	0	0	0				
				0	0	0	0	0,2
1	0,4	200	200	200	100	150	150	0,6
2	0,8	400	200	200	50	187	187	1,0
3	1,2	500	100	100	62,5	122	122	1,4
4	1,6	500	0	0	40,5	30	30	1,8
5	2,0	500	0	0	20	7,5	7,5	2,2
6	2,4	500	0	0	10	2,5	2,5	2,6
				0	5	1,8	1,8	2,6

6.6 Викривлення і загасання хвиль

Загасання хвиль перенапруг ЛЕП незначне через малий активний опір проводів.

Однак у ряді випадків має місце витрата енергії на незворотні теплові втрати. Хвилі перенапруг при цьому загасають і спотворюються.

Для хвилі, що поширюється між проводом і землею, основну роль грають втрати в землі. Фронт хвилі еквівалентний струмам високої частоти, при

яких у масивних провідниках проявляється поверхневий ефект і активний опір провідника зростає. Земля, яка відіграє роль зворотного проводу при поширенні хвиль, є таким масивним провідником.

Високочастотні складові струмів витісняються до поверхні землі і, зустрічаючи підвищений опір, загасають. Амплітуда хвилі перенапруг при цьому зменшується, а фронт згладжується за рахунок зменшення відносного вмісту високочастотних складових.

Помітне загладжування хвилі спостерігається при ґрунтах з високим питомим опором ($\rho > 10^2$ Ом·м) і великому пробігу хвилі.

Припустивши, як зазвичай, що в місці виникнення перенапруги хвиля має прямокутну форму (прямовисний фронт $\tau_\phi = 0$), можна підрахувати довжину l фронту хвилі після пробігу по лінії з хвильовим опором Z .

$$\tau_\phi = \frac{\rho \cdot l^2}{260 \cdot h^2 \cdot Z^2} \quad , \quad \text{мкс}$$

При поширенні уздовж лінії грозових хвиль на фронті виникає імпульсна корона. Хвилі грозової напруги мають переважно негативну полярність, крім того, негативна корона менш інтенсивна ніж позитивна і, отже, менш сприяє загасанню небезпечних перенапруг.

Тому розрахунок зазвичай ведеться на негативну корону.

При високій напруженості поля поблизу проводу розвиваються іонізаційні процеси.

У лавинах, що виникають, електрони виносяться на зовнішню «оболонку» коронного чохла, залишаючи за собою важкі позитивні іони.

В області слабкого поля електрони захоплюються частинками газу, утворюючи негативні іони, які концентруються в зовнішньому шарі коронного чохла.

Швидкість електронів така велика, що іонізаційні процеси можна вважати такими, які виникають практично миттєво.

З іншого боку, швидкість позитивних іонів настільки мала, що на фронті хвилі їх можна вважати нерухомими. В силу цього сумарний заряд на проводі та в коронному чохлі залежить тільки від миттєвого значення напруги і практично не змінюється з крутістю хвилі.

При наявності імпульсної корони зв'язок заряду q і напруги u на проводі виражається нелінійною кулон-вольтовою характеристикою виду

$$q = C_0 \cdot u \cdot (1 + B \cdot u) \quad ,$$

де $C_{0к} = dq / du = C_0 \cdot (1 + 2 \cdot B \cdot u)$ – диференціальна або динамічна ємність приводу при імпульсній короні.

Швидкість руху хвилі по лінії, яка коронує, зменшується

$$V_k = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_{0к}(u)}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u}}} = \frac{C}{\sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u}}$$

Рух хвилі по лінії, яка коронує, наочно можна представити в наступному вигляді.

Падаюча хвиля розбивається на вузькі смуги (по напрузі). Кожна зі смуг поширюється самостійно. Смуги з більш високою напругою мають меншу швидкість.

Відставання смужки, що відповідає напрузі u після пробігу l дорівнює

$$\Delta t(u) = \frac{l}{V_k} - \frac{l}{C} = \frac{l}{C} \cdot [\sqrt{1 + 2 \cdot B \cdot u} - 1] = \frac{l}{C} \cdot B \cdot u$$

Розходження швидкостей смуг призводить до спотворення фронту хвилі в міру її просування.

На хвості хвилі подальший розвиток корони припиняється, і коронний чохол повільно розпадається.

За умови виникнення прямокутної хвилі, фронт хвилі після пробігу l по лінії, яка коронує буде

$$\Delta \tau_\phi = \left(0,5 + \frac{0,008 \cdot U_0}{h} \right) \cdot l \quad , \quad \text{мкс}$$

Загасання та деформація хвиль є сприятливими факторами, які полегшують роботу електроустаткування підстанцій.

Небезпека ударів блискавки в ЛЕП значно зменшується при віддаленні місця удару від підстанції, тому її ізоляція і грозозахист розраховуються на вплив перенапруг від віддалених ударів блискавки в лінії електропередач.

У той же час небезпека впливу перенапруг близьких до підстанції ударів блискавки запобігається спеціальними заходами (тросовий захищений підхід, кабельне підведення напруги і т.д.).

7 Хвильові процеси в електричних машинах

7.1 Первісний розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора

Під дією хвиль перенапруг, що набігають з ЛЕП на підстанцію, в трансформаторах виникають складні електромагнітні процеси, що призводять до перенапруг в обмотках.

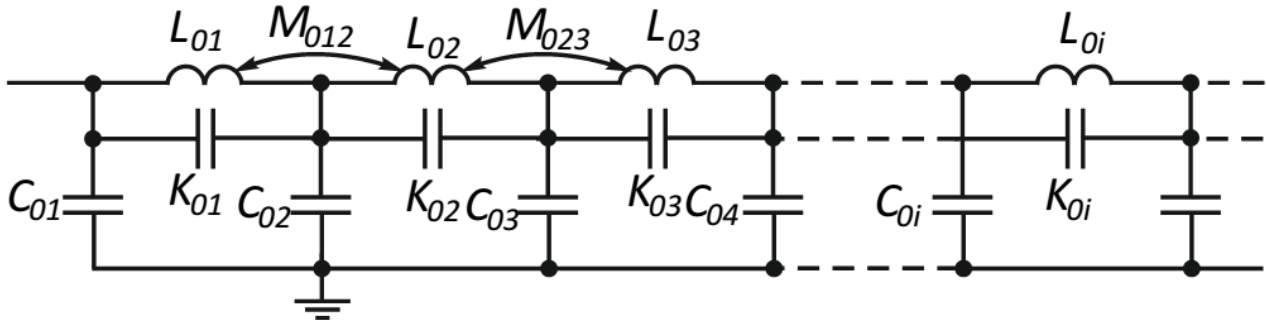
Сумарна довжина проводу в обмотках трансформаторів ВН досягає декількох кілометрів, тому хвильові процеси в обмотках мають деяку аналогію з процесами в лініях електропередач.

Однак схема заміщення обмотки трансформатора значно складніше і тут з'являються два додаткових параметра: ємність між сусідніми котушками або витками – K (так звана поздовжня ємність) та взаємна індуктивність $M(K)$ кожного витка з усіма іншими витками обмотки.

У схемах заміщення зазвичай приймають наступні позначення:

L_0 – середнє значення індуктивності на одиницю довжини обмотки;
 C_0 – середнє значення ємності на одиницю довжини відносно землі (поперечна ємність);
 K_0 – середнє значення ємності між елементами обмотки на одиницю довжини.

Для аналізу процесів як і раніше розглядається хвиля з прямовисним фронтом нескінченної довжини.



Процес набігання хвилі еквівалентний включенню даної схеми на постійну напругу U_0 . У трансформаторі при цьому протікає перехідний процес.

Для спрощення задачі вважають, що індуктивність L і взаємна індуктивність M обмотки в момент набігання хвилі не встигають робити свого впливу (їх опір хвилям високої частоти великий).

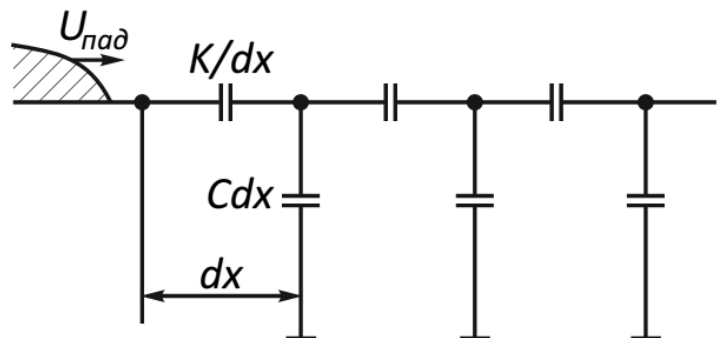
При цьому схема отримує наступний вигляд

Диференціальне рівняння перехідного процесу

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{C_0}{K_0} \cdot u = 0$$

звідки

$$u = A \cdot e^{\alpha \cdot x} + B \cdot e^{-\alpha \cdot x} ,$$



де A та B – постійні інтегрування; $\alpha = \sqrt{C_0/K_0}$ – коефіцієнт розповсюдження.

Постійні інтегрування і вигляд усього рівняння визначаються режимом заземлення нейтралі.

Заземлена нейтраль:

при $x = 0$ $u = U_0$ – (початок обмотки)
 при $x = l$ $u = 0$ – (кінець обмотки)

Отже, розподіл напруги по довжині обмотки (координата x) описується рівнянням

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} - e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}}$$

Ізольована нейтраль:

при $x = 0$ $u = U_0$
 при $x = l$ $du/dx = 0$ поздовжній струм відсутній

$$u = U_0 \frac{e^{\alpha(l-x)} + e^{-\alpha(l-x)}}{e^{\alpha l} + e^{-\alpha l}}$$

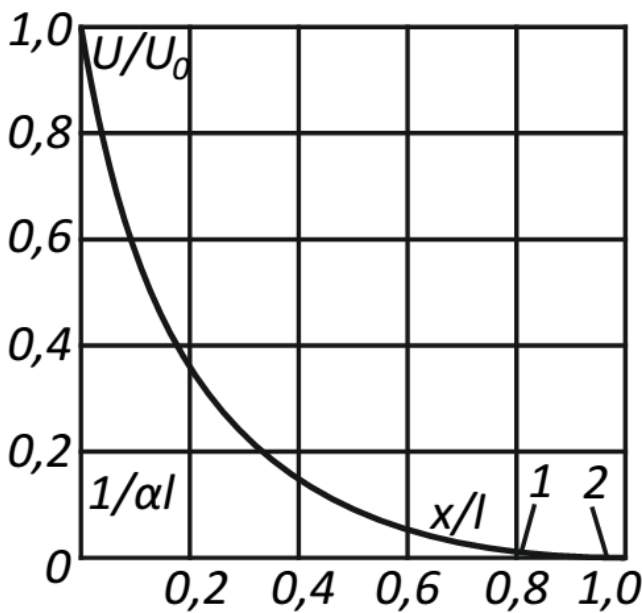
Параметр $\alpha \cdot l$ характеризує крутість спаду кривої розподілу напруги в початковий момент (крива ємнісного розподілу).

$$\alpha \cdot l = \sqrt{\frac{C_0}{K_0} \cdot l} = \sqrt{\frac{C_0 \cdot l}{K_0}} = \sqrt{\frac{C_{ОБ}}{K_{ОБ}}}$$

який визначається відношенням сумарної ємності обмотки відносно землі до сумарної поздовжньої ємності (тобто до ємності між крайніми витками обмотки).

Для сучасних трансформаторів $\alpha \cdot l \approx 10 \dots 30$, тому для значної частини обмотки крива розподілу напруги практично однакова для трансформаторів з ізольованою та заземленою нейтраллю.

$$u = U_0 \cdot e^{-\alpha l \frac{x}{l}}$$



1 – ізольована нейтраль

2 – заземлена нейтраль

Таким чином, в початковий момент часу розподіл напруги уздовж обмотки вкрай нерівномірний.

Напруга між сусідніми витками обмотки може перевершувати нормальну в 10 разів.

Максимальний градієнт напруги

$$\frac{du}{dx} = U_0 \cdot \alpha = \frac{U_0}{l} \cdot \alpha \cdot l$$

Цей вираз отримано з

$$\frac{du}{dx} = \alpha \cdot U_0 \cdot e^{-\alpha l \frac{x}{l}} \quad \text{при } x = 0$$

і показує, що максимальний градієнт напруги перевищує градієнт при нормальній роботі в $\alpha \cdot l$ разів.

Дослідження показують, що перенапруги менші за розміром можуть виникати уздовж всієї обмотки ($x \neq 0$), однак ці імпульси будуть запізнюватися в порівнянні з імпульсами на початку обмотки.

7.2 Коливання в обмотках трансформаторів

З розглянутої раніше схеми заміщення випливає, що трансформатор являє собою складну коливальну систему, що володіє спектром власних частот коливань $\omega_1 \dots \omega_\infty$.

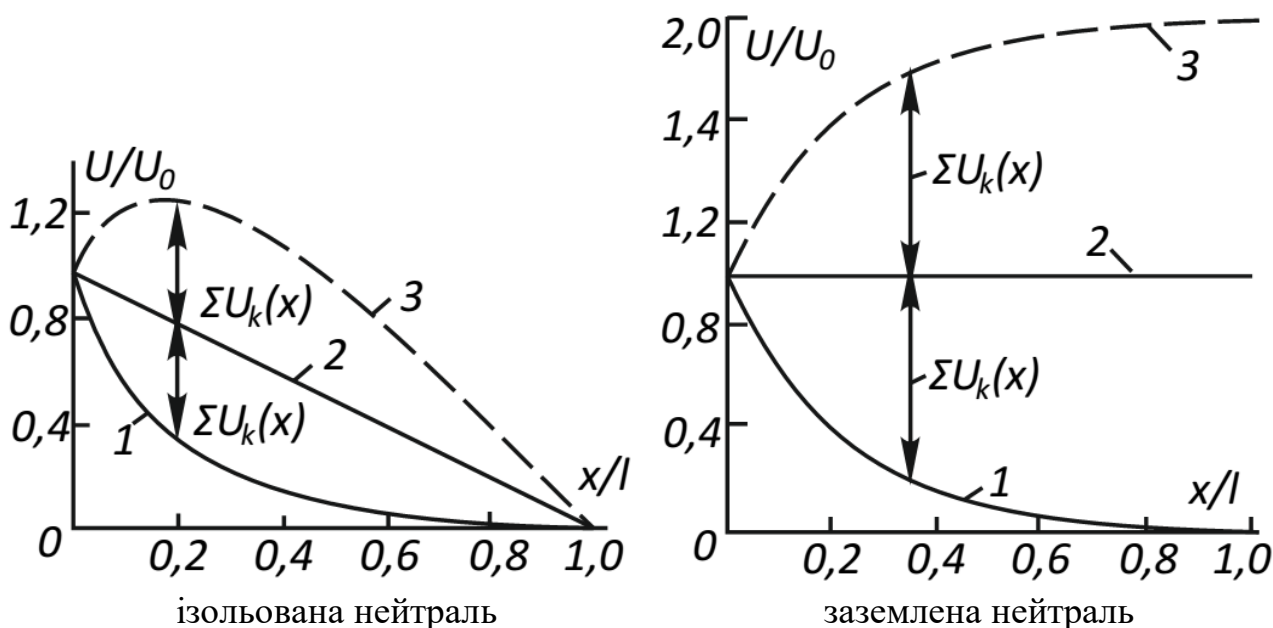
Відзначимо особливу причину виникнення коливання. Криві розподілу напруги в початковий момент (при набіганні хвилі) наведені раніше. Вони практично збігаються для трансформаторів з ізольованою або заземленою нейтраллю. Інша справа – розподіл напруги в сталому режимі. Після закінчення перехідного процесу вимушене розподілення напруги по витках обмотки $u_{IP(x)}$ буде визначатися величиною ЕРС, що наводиться у витках сумарним магнітним потоком. Оскільки обмотка однорідна падіння напруги буде рівномірним. При заземленій нейтралі ця напруга рівномірно спадає від U_0 на початку обмотки до 0 в нейтралі

$$u_{IP(x)} = U_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

При ізольованій нейтралі сталі значення поздовжнього струму $I_{IP} = 0$ і, отже, примушений розподіл виражається лінією, що паралельна осі абсцис

$$u_{IP(x)} = U_0$$

Таким чином, у кожній точці обмотки є певна невідповідність між значенням напруги при $t = 0$ (при набіганні фронту хвилі) та значенням напруги при $t = \infty$ (у сталому режимі). Ця невідповідність і є причиною виникнення власних коливань обмотки.



- 1 – криві початкового розподілу
- 2 – криві усталеного розподілу
- 3 – огибаюча амплітуд коливань

Амплітуда коливань

$$U_A = U_{уст} - U_{нач}$$

Максимальна напруга на ізоляції, що виникає в результаті коливань

$$U_{макс} = U_{уст} + U_A = 2 \cdot U_{уст} - U_{нач}$$

Для складної коливальної системи розрахунок ведеться за максимумом першої гармоніки. Вважається, що вищі гармоніки до цього часу встигають згаснути.

Таким чином, розподіл максимальних напруг в обмотці знаходиться шляхом накладення на криву вимушеного розподілу $u_{пр(x)}$ 0,75 амплітуди першої гармоніки коливань. Коефіцієнт 0,75 враховує загасання коливань від моменту $t = 0$, до моменту, коли коливання досягають амплітудного значення.

При коротких імпульсах перенапруг, що набігають на трансформатор, напруги в обмотці встигають досягти максимальних значень при відносно тривалих імпульсах ($\tau > T_1/2$). Якщо $\tau \ll T_1$, коливання основної гармоніки не встигають розвинутися і напруги в обмотці залишаються близькими до кривої початкового розподілу.

T_1 – період вільних коливань в обмотці (по першій гармоніці). Зазвичай, визначається ємністю та індуктивністю обмотки. Для трансформаторів 110 кВ і вище $T_1 = 50 \dots 100$ мкс, що відповідає частоті коливань 10...20 кГц.

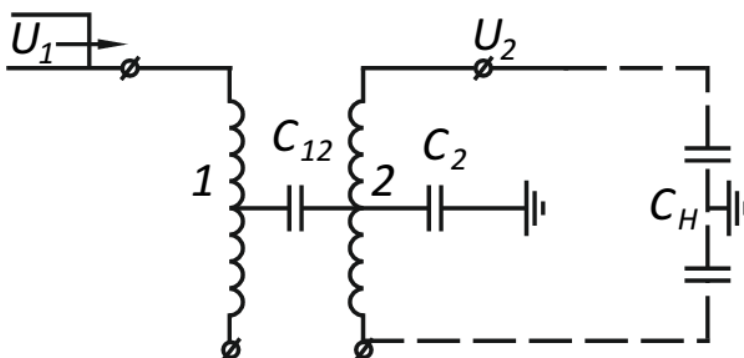
Таким чином, при заземленні нейтралі максимальні перенапруги виникають у лінійного кінця, а при ізолюванні – в нейтралі трансформатора.

До нейтралі трансформатора зазвичай підключається розрядник, який обмежує перенапруги в нейтралі відповідно до своїх характеристик.

Оскільки рівень обмеження перенапруг зазвичай малий, перехідні процеси в трансформаторах з розрядником у нейтралі розвиваються так само, як і в обмотках із заземленою нейтраллю.

7.3 Перехід хвиль із однієї обмотки на іншу

Падіння хвиль на одну з обмоток трансформатора призводить у деяких режимах до появи перенапруг і на інших обмотках. При цьому найбільшу небезпеку становить так звана ємнісна передача хвиль.



У початковий момент часу потенціал обмотки 2 пов'язаний з потенціалом обмотки 1 через ємнісний зв'язок.

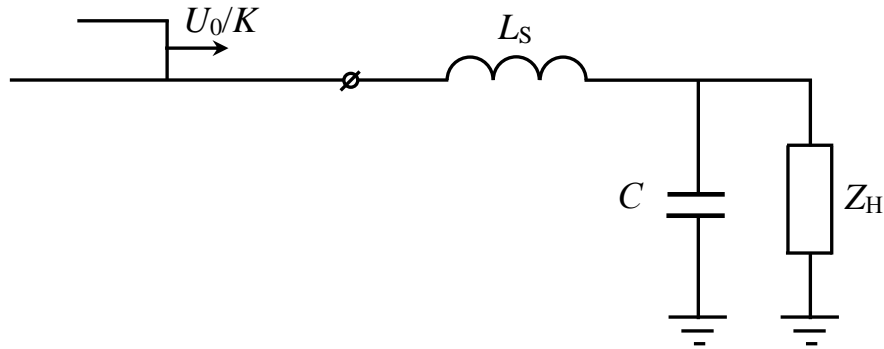
$$U_2 = U_1 \cdot \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2 + C_H}$$

C_{12} – ємність між обмотками;

C_2 – сумарна ємність обмотки 2 на землю та ємність всіх підключених до неї струмоведучих елементів мережі; C_H – ємність навантаження (підключених ліній або спеціальних конденсаторів).

Величина перенапруг, що проходять на вторинну обмотку, різко зменшується при наявності навантаження, тобто напруга U_2 істотна лише при відключених лініях.

Передача або перехід хвиль може здійснюватися, крім того, через магнітний зв'язок обмоток. Схема заміщення цього процесу виглядає так:



де K – коефіцієнт трансформації; C – ємність, що включена на виводах трансформатора; Z_H – навантаження трансформатора.

Напруга на виводі обмотки 2 буде прагнути до величини U_0/K , що є цілком безпечним.

Однак, при $Z_H \gg 1/2 \cdot \sqrt{L_s/C}$ процес наростання напруги буде періодичним – шляхом згасаючих коливань. Амплітуда цих коливань на виводі обмотки 2 може виявитися близькою до $2 \cdot U_0/K$, тобто може бути небезпечною для ізоляції генераторів, які підключені до обмотки 2.

Розглянуті схеми не відображають підвищення потенціалів всередині обмотки 2, які мають місце у всіх випадках.

7.4 Особливості перехідних процесів в трифазних трансформаторах

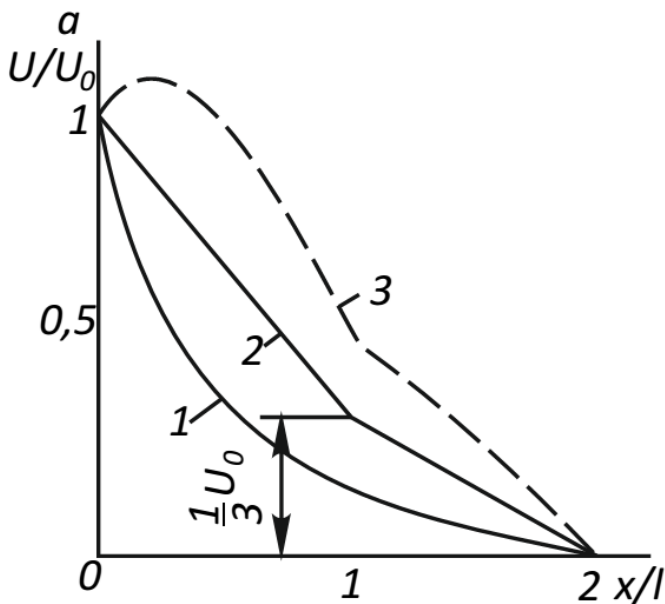
1. Розглянемо випадок набігання хвилі на обмотку трансформатора, з'єднаного зіркою. Хвиля набігає по одній фазі (А). Оскільки дві інші фази (В і С) заземлені через малі хвильові опори ліній, що відходять, вважаємо що фази В и С заземлені (з'єднані із землею наглухо).

Об'єднавши їх за правилами паралельного додавання перейдемо до однофазної схеми обмотки із заземленим кінцем (нейтраллю).

Початковий розподіл на обмотці як і раніше представляється виразом

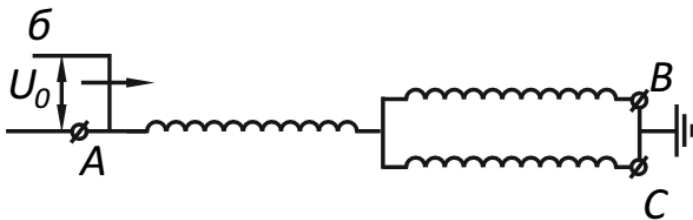
$$U_H = U_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

Вимушений розподіл має перелом у точці $x = l$ оскільки індуктивний опір паралельно з'єднаних обмоток В і С вдвічі менше опору обмотки фази А. Потенціал нейтралі в перехідному режимі не перевершує $2/3 \cdot U_0$.

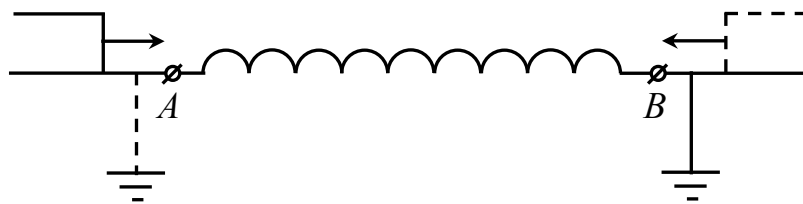


- 1 – початковий розподіл напруги
- 2 – усталений розподіл напруги
- 3 – максимальний потенціал

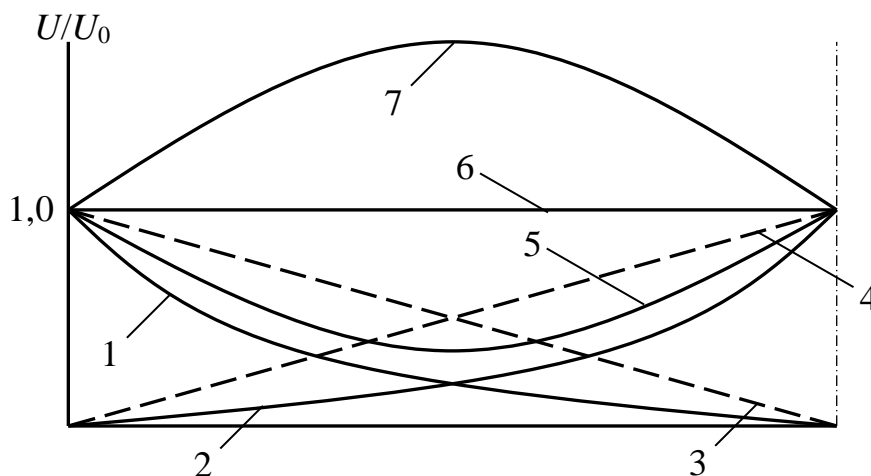
При набіганні хвилі на дві фази обмотки трансформатора, потенціал нейтралі досягає величини $1,3 \cdot U_0$. Це значення можна отримати, застосувавши раніше використаний метод.



2. Падіння хвиль по 3 фазам на обмотку трансформатора, з'єднану в трикутник.



Розглянемо набігання хвилі на обмотку АВ. Застосуємо принцип накладення. Вважаємо спочатку, що набігає по фазі А, затискач обмотки В при цьому вважається заземленим. І навпаки, при набіганні хвилі на затискач В обмотки вважаємо затискач А заземленим. Сумуючи дію обох хвиль, отримаємо результуючу криву, що має місце при спільній дії хвиль на затискач А та на затискач В.



На попередньому рисунку позначено:

- 1, 2 – криві початкового розподілу напруги при набіганні хвилі на затискачі А та В відповідно;
- 3, 4 – криві усталеного розподілу напруги для цих же випадків;
- 5, 6 – криві початкового та вимушеного розподілу напруги при спільній дії хвиль;
- 7 – огинаюча амплітудних значень напруги в результаті коливань при спільній дії хвиль.

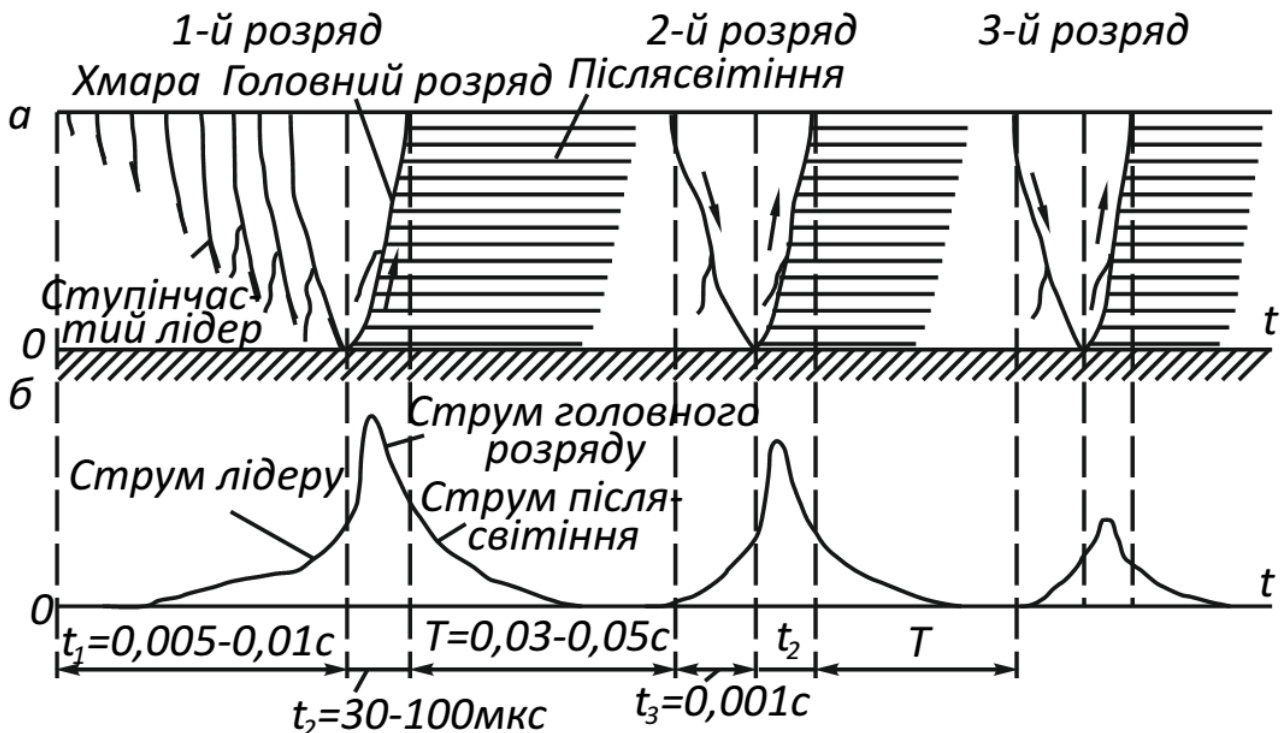
З кривих видно, що максимальні напруги, що досягають $2 \cdot U_0$, виникають в середині обмотки.

Вплив імпульсів на обмотки обертових машин в основному аналогічний впливу імпульсів на трансформатори, проте величина імпульсів, що досягають ізоляції генераторів і двигунів невелика. Основну небезпеку для пазової ізоляції представляють так звані градієнтні перенапруги (міжвиткові). Для зниження цих перенапруг здійснюють схеми захисту, які забезпечують зменшення крутості хвиль, що набігають, до рівня 5...6 кВ/мкс.

8 Блискавка як джерело перенапруг

8.1 Електричні характеристики блискавки

Розряд блискавки в основних рисах подібний до довгої іскри, яка виникає в повітрі між провідними електродами. Через неоднорідний розподіл зарядів у грозовій хмарі та малої щільності заряду блискавка складається з декількох одиничних розрядів, що розвиваються за тим самим шляхом.



Найбільш часті блискавки з амплітудою струму до 50 кА, блискавки зі струмом 50...100 кА бувають рідко, а понад 100 кА (до 200) дуже рідко.

Струм блискавки має хвилеподібний характер.

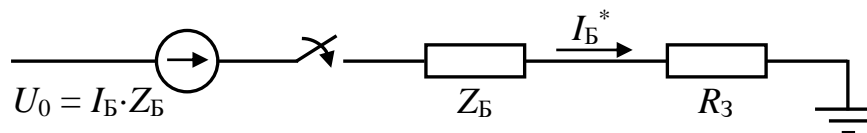
Тривалість блискавки досягає десятих часток секунди (дуже рідко 1с). Температура каналу блискавки досягає 25000°C . Початок розвитку розряду блискавки відповідає напруженості 20...25 кВ/см. З усіх розрядів блискавки на частку розрядів «хмара-земля» припадає 30...40% загальної кількості.

Загальний заряд, що протікає через канал багаторазової блискавки становить порядку 10 Кл. Максимально зареєстроване значення електричного розряду – 100 Кл.

Перехід від лідерної стадії розряду до головного розряду протікає з великою швидкістю, крутість фронту досягає 100 кА/мкс.

У загальному випадку для розрахунків приймається хвиля струму з лінійним зростанням на фронті та експоненціальним спадом на хвості. Цілком очевидно, що величина струму блискавки визначається не тільки електричним зарядом хмари, але й параметрами самого каналу блискавки і електричними параметрами ураженого об'єкта.

У розрахунках грозостійкості блискавка заміщується еквівалентною схемою.



де I_B – струм блискавки в ідеально заземленому об'єкті ($R_3 = 0$); I_B^* – струм блискавки при ударі в об'єкт з опором заземлення R_3 ; Z_B – хвильовий опір каналу блискавки (200...300 Ом); $U_0 = I_B \cdot Z_B$ – ЕРС еквівалентного джерела.

Представлення блискавки джерелом струму пояснюється тим, що струм мало залежить від опору R_3 , і визначається, в основному, параметрами хмари та самого каналу блискавки.

$$I_B^* = I_B \cdot \frac{Z_B}{Z_B + R_3}$$

Аналіз формули показує, що при ударі блискавки в опору ЛЕП її струм практично дорівнює найменшому можливому ($I_B^* = I_B$) оскільки опір заземлення опор малий (не перевищує 25 Ом).

При ударі ж блискавки в провід ЛЕП або грозозахисний трос струм блискавки обмежується їх хвильовим опором приблизно до половинного значення.

8.2 Характеристика грозової діяльності

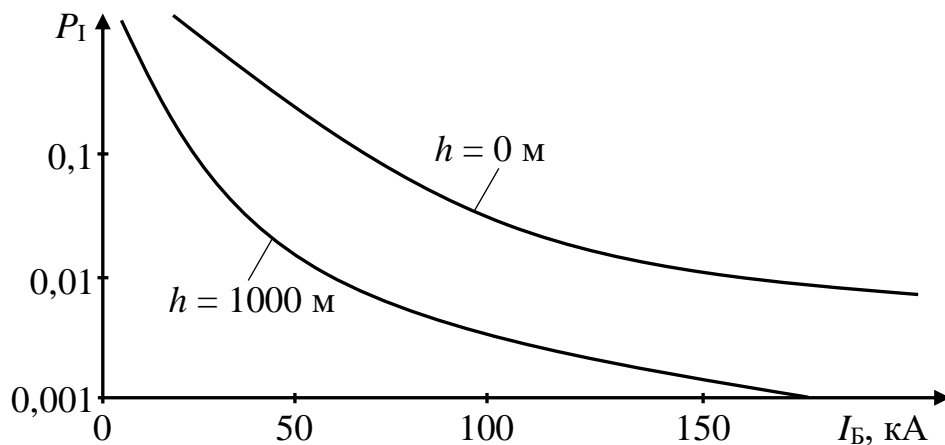
Інтенсивність грозової діяльності характеризується числом грозових днів на рік n_d , або числом грозових годин на рік n_g . У нашій країні цю інтенсивність характеризують числом грозових годин, оскільки кількість

уражень блискавкою будь-яких об'єктів залежить від загальної тривалості гроз, а не від їх числа.

Число годин грозової діяльності встановлюється як середнє за ряд років спостережень для даного району. На підставі даних таких спостережень складаються карти грозової діяльності, на які наносяться лінії рівної тривалості гроз.

Щоб визначити можливу кількість прямих ударів блискавки в якусь споруда, необхідно, крім числа годин грозової діяльності, знати також число поразок блискавкою 1 км² земної поверхні на рік. За даними багаторічних спостережень, це число, віднесене до 1 год. грозової діяльності, становить в середньому 0,07.

Крива ймовірності амплітуди струму блискавки має такий вигляд:



Ймовірність P_1 струмів блискавки, що перевищують значення I_B , можна також визначити за емпіричною залежністю.

$$\lg P_1 = 0,666 - \sqrt{I_B / I_0} \quad ,$$

де $I_0 = 18,75 + 6,25 \cdot \cos \psi$; $\psi = h / 5,55$; h – висота місцевості над рівнем моря, м.

Наведена формула справедлива при висотах від 0 до 1000 м.

Для рівнинних районів можна користуватися усередненим розподілом, який досить точно описується емпіричною формулою

$$\lg P_1 = - I_B / 60 \quad ,$$

де I_B – амплітуда струму блискавки в кілоамперах.

Тривалість фронту імпульсу також є статистичною величиною, тому вона має свій ймовірний розподіл. Однак більш зручно характеризувати блискавку середньою швидкістю зміни струму на фронті

$$a = I_M / \tau_\Phi$$

Криві ймовірностей крутості струму блискавки описуються емпіричною формулою

$$\lg P_a = - a / a_0 ,$$

де a_0 – крутість фронту, що відповідає ймовірності $P_a = 0,1$.

Усереднено для рівнинних районів можна прийняти $a_0 = 36$ кА/мкс, а для гірських – 18 кА/мкс.

Об'єкти, що здіймаються над поверхнею землі, внаслідок розвитку з них зустрічних лідерів, збирають удари блискавки з більшої площі. Наприклад, число ударів блискавки в споруду заввишки H та розмірами $A \times B$ (м) може бути розраховане за формулою (питома ураженість земної поверхні 0,067 уд/км² за 1 грозову годину):

$$n_{уд} = 6,7 \cdot (A + 7 \cdot H) \cdot (B + 7 \cdot H) \cdot 10^{-6} , \text{ ударів/100 гр.г на рік}$$

Лінії електропередач є найбільш протяжними елементами електричних систем, тому вони частіше піддаються впливу атмосферних перенапруг.

Загальне число розрядів блискавки на рік зазвичай підраховують:

$$N = 0,067 \cdot 6 \cdot h \cdot L \cdot 10^{-3} \cdot n_{ч} = 0,4 \cdot h \cdot L \cdot 10^{-3} \cdot n_{ч} ,$$

де h – середня висота підвіски грозозахисного троса або проводу, м; L – довжина лінії, км.

Для порівняння пристроїв грозозахисту ліній застосовують такий показник як питома число відключень $n_{пит}$. Воно підраховується:

на довжину лінії 100 км при $n_{д} = 20$ ($n_{г} = 30$)

$$n_{пит} = 0,4 \cdot h \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 30 = 1,2 \cdot h , \text{ ударів/100 км за 20 гр. днів}$$

на довжину лінії 100 км при $n_{г} = 100$

$$n_{пит} = 0,4 \cdot h \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 4 \cdot h , \text{ ударів/100 км за 100 гр. годин}$$

8.3 Захист від прямих ударів блискавки за допомогою блискавковідводів

Історія блискавковідводу починається з 1749 року, коли Франклін запропонував захищати будівлі металевими стержнями – «громовідводами», як їх неправильно називали в минулому.

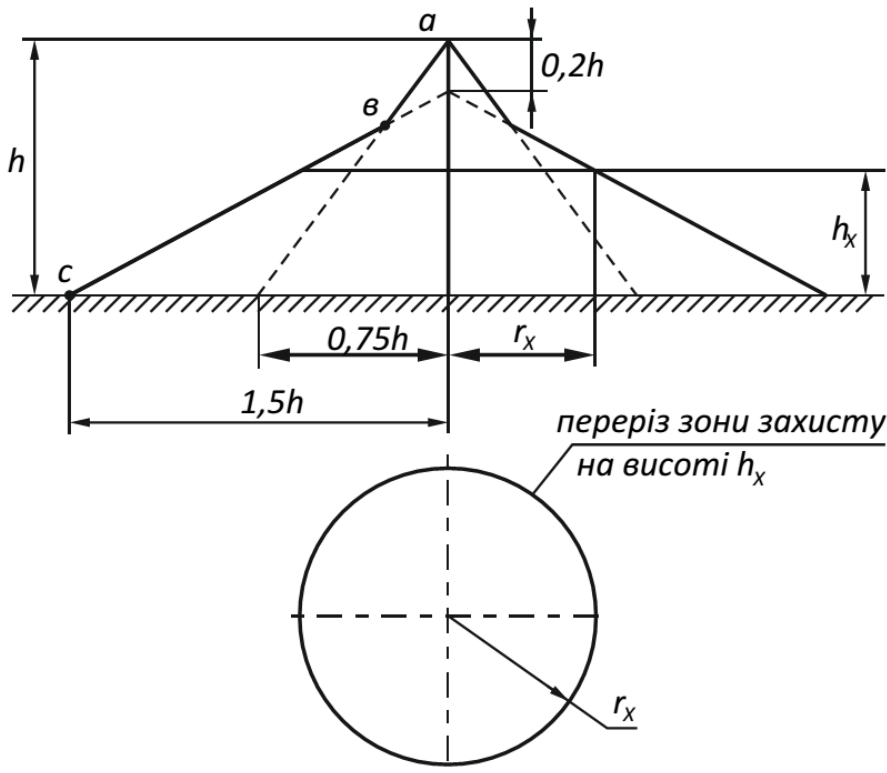
Захисна дія блискавковідводу проявляється в лідерній стадії грозового розряду. При цьому на вершині блискавковідводу скупчуються заряди і найбільші напруженості створюються на шляху між лідером, що розвивається, та вершиною блискавковідводу. Виникнення і розвиток з блискавковідводу зустрічного лідера ще більше підсилює напруженості поля на цьому шляху, що остаточно визначає удар в блискавковідвід.

Об'єкт захисту більш низький ніж блискавковідвід, екранується їм та зустрічним лідером і тому практично не уражається блискавкою.

Простір, що захищається від прямих ударів блискавки, називається захисною зоною блискавковідводу.

Внаслідок того, що траєкторії блискавки варіюються, захищеність об'єкта, розташованого усередині зони захисту забезпечується лише певним ступенем надійності (не менш 99,9 %).

Зони захисту блискавковідводів визначаються на моделях на які подаються хвилі напруг від ГІН (в лабораторних умовах).



$$r_x = h_a \cdot \frac{1,6}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot p$$

де h_a – активна висота блискавковідводу

$$h_a = h - h_x$$

Зона захисту стержньового блискавковідводу утворює «шатро», радіус якого на висоті об'єкта h_x дорівнює r_x .

При висоті блискавковідводу до 30 м коефіцієнт $p = 1$. При висоті понад 30 м ефективність блискавковідводу знижується, тому вводиться коефіцієнт

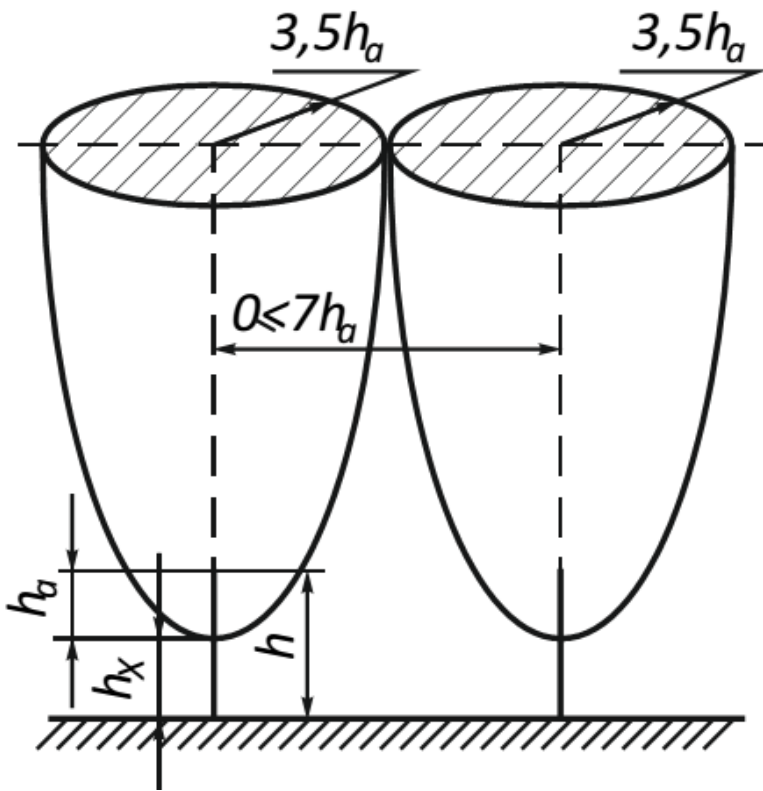
$$p = 5,5/\sqrt{h}$$

Будь-який блискавковідвід має так звану «зону 100%-ої поразки», в якій лідер блискавки завжди розвивається у напрямку до блискавковідводу.

На висоті орієнтації блискавки $H_x = (10...20) \cdot h$ радіус цієї зони дорівнює

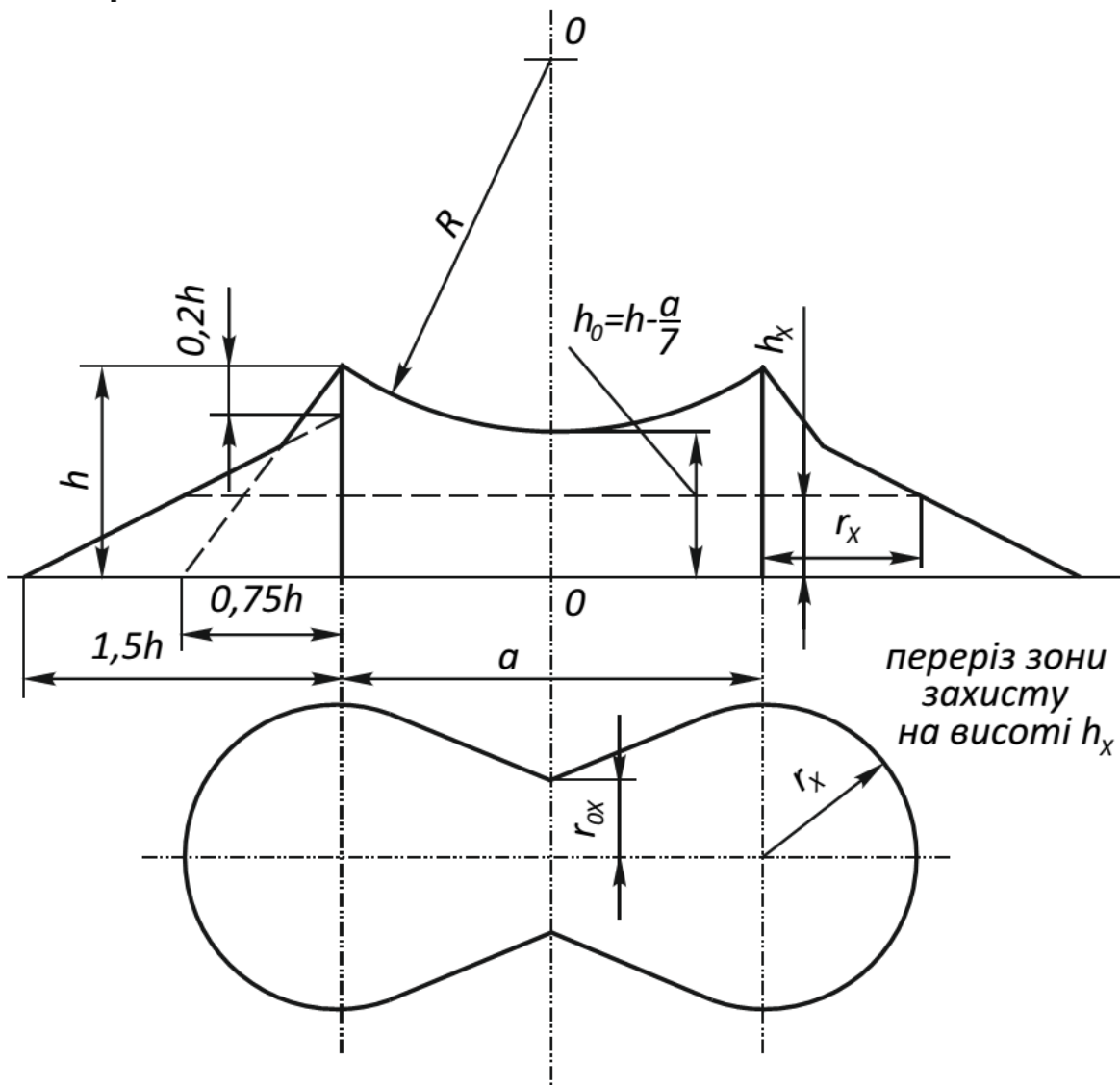
$$R_x = 3,5 \cdot h_a$$

З цієї причини захисна зона 2-х стержньового блискавковідводу має значно більші розміри, ніж сума захисних зон двох одиночних блискавковідводів.



$$r_{0x} = 4 \cdot r_x \cdot \frac{7 \cdot h_a - a}{14 \cdot h_a + a}$$

при $a > 6 \cdot h$ блискавковідводи розглядаються як окремі

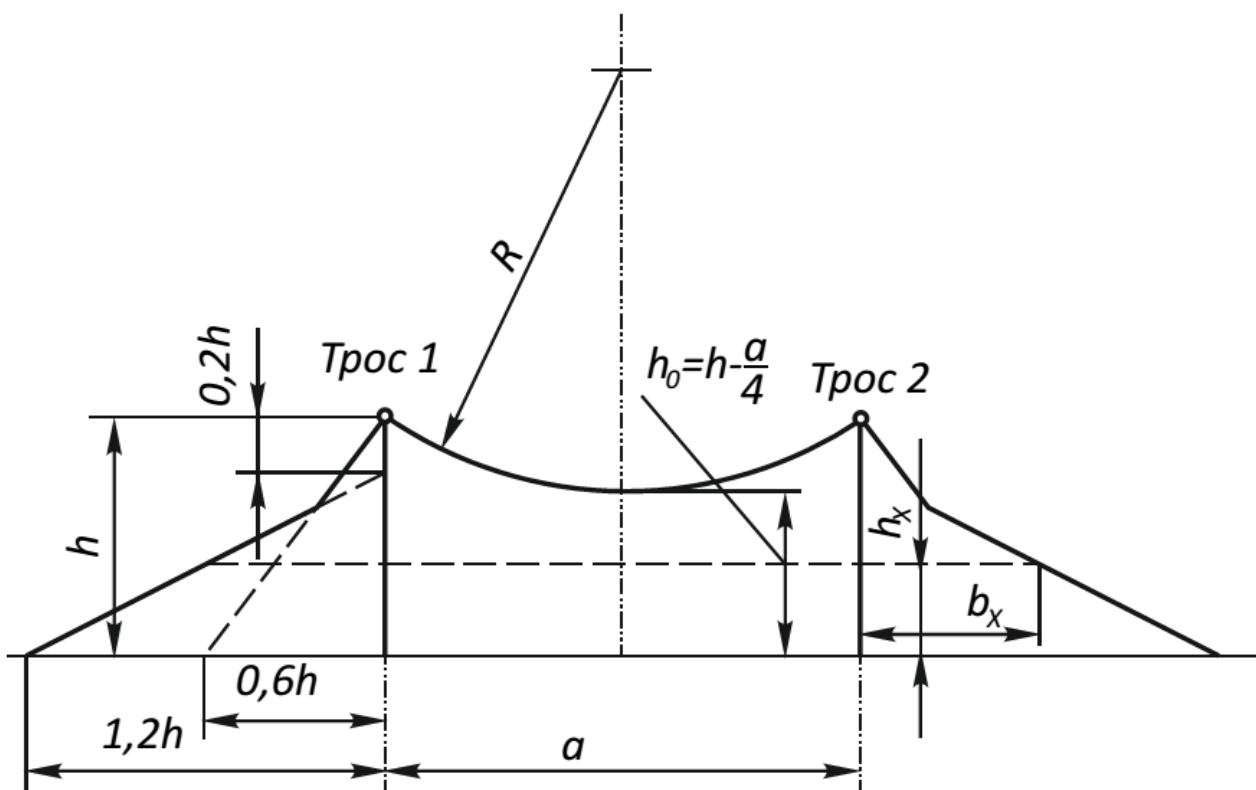
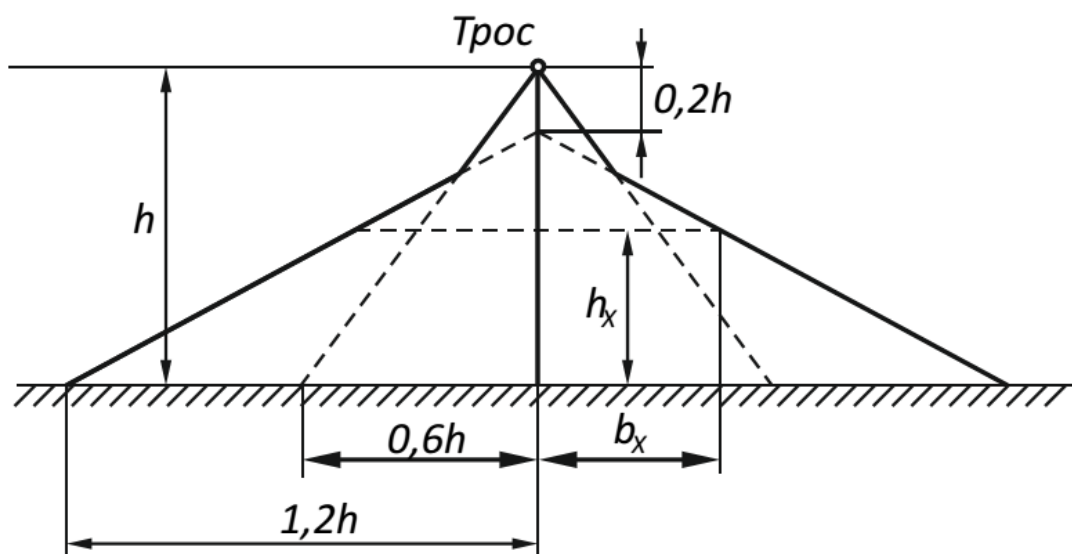


Відкриті розподільні пристрої захищаються зазвичай декількома блискавковідводами. У цьому випадку рівень h_x всередині трикутника (або прямокутника) утвореного блискавковідводами буде захищений, якщо діаметр кола D , що проходить через проєкції блискавковідводів (або діагональ прямокутника) задовольняє умові:

$$D \leq 8 \cdot (h - h_x) \cdot p$$

При довільному розташуванні чотирьох і більше блискавковідводів ця умова повинна бути перевірена окремо для кожної трійки найближчих один до одного блискавковідводів.

Захисні зони тросових блискавковідводів будуються аналогічно стержньовим.



8.4 Будова блискавковідводів

Блискавковідвід складається з блискавкоприймача, струмовідводу і заземлювача.

Струм блискавки, проходячи по блискавковідводу, створює падіння напруги на опорі заземлювача та індуктивності струмовідводу. Якщо, розглянути хвилю з косокутним фронтом $i_B = a \cdot t$, максимальний потенціал у точці блискавковідводу, на відстані l від заземлювача настає в момент максимуму струму блискавки і дорівнює:

$$U_l = I_B \cdot R_l + a \cdot L_0 \cdot l \quad ,$$

де $L_0 \cdot l$ – індуктивність струмовідводу (зазвичай $L_0 = 1,7$ мкГн/м).

Прийнявши 10% відсоткову ймовірність ураження підстанції (що відповідає $I_B = 60$ кА і $a = 30$ кА/мкс), отримуємо (при $R_l = 0,5$ Ом і $l = 15$ м)

$$U_l = 60 \cdot 0,5 + 30 \cdot 1,7 \cdot 15 = 780 \quad , \quad \text{кВ}$$

Така напруга небезпечна для ізоляції до 110...150 кВ. З цієї причини ВРП-35...110 кВ обладнуються окремо встановленими блискавковідводами. Тим більше, блискавковідводи намагаються не встановлювати на трансформаторних порталах, оскільки обмотки і уводи НН трансформаторів мають низьку електричну стійкість.

При установленні на підстанції розташованих окремо блискавковідводів повинні дотримуватися безпечні відстані по повітрю і в землі від блискавковідводів та їх заземлювачів до елементів розподільного пристрою.

При тих же розрахункових параметрах блискавки та припустимій напруженості електричного поля в повітрі $E_{\Pi} = 500$ кВ/м

$$L_{\Pi} \geq \frac{60 \cdot R_l + 30 \cdot 1,7 \cdot l}{500} = 0,3 \cdot R_l + 0,1 \cdot l$$

При розрахункових параметрах блискавки 150 кА та 30 кА/мкс

$$L_{\Pi} \geq \frac{150 \cdot R_l + 30 \cdot 1,7 \cdot l}{500} = 0,12 \cdot R_l + 0,1 \cdot l$$

Для запобігання перекриття в землі ($E_3 = 300$ кВ/м) потрібно забезпечити відстань між заземлюючими контурами об'єкта та блискавковідводом (відстань в землі)

$$L_3 \geq \frac{I_B \cdot R_l}{300} = \frac{60 \cdot R_l}{300} = 0,2 \cdot R_l$$

При проходженні через заземлювач імпульсу струму блискавки, його опір відрізняється від виміряного або розрахункового значення.

При великих імпульсних струмах щільність струму, що проходить через заземлюючі електроди велика, тому в землі біля поверхні електродів створюються дуже високі напруженості поля, які перевершують пробивні напруженості землі. Навколо заземлювача утворюються зони іскріння, що збільшують ефективні розміри електродів і опір заземлення зменшується.

З іншого боку, швидке наростання імпульсного струму створює падіння напруги на індуктивності протяжного заземлювача, що обмежує відведення струму з віддалених його частин. При цьому опір заземлення збільшується.

В результаті впливу обох факторів (утворення зони іскріння та падіння напруги на індуктивності) опір заземлення при проходженні струму блискавки, так званий імпульсний опір R_I , виявляється залежним від розмірів і конструкції заземлювача, амплітуди струму блискавки та питомого опору ґрунту. Ця залежність враховується імпульсним коефіцієнтом α_I .

Ефективність блискавковідводу зростає при зменшенні опору заземлення, тому зниження загального імпульсного опору досягається застосуванням складних заземлювачів.

При цьому варто враховувати, що загальний опір системи підраховується з урахуванням взаємного впливу електродів.

$$R_{\text{сист}} = \frac{R}{n} \cdot \frac{\alpha_I}{\eta_B},$$

де R – опір одиночного заземлювача; n – кількість одиночних заземлювачів (електродів); η_B – коефіцієнт використання.

Значення імпульсного та коефіцієнта використання для складних заземлювачів:

Конструкція заземлювача	Число електродів	α_I при ρ Ом·м				η_B
		100 глина	200 суглинок	500 супісок	1000 пісок	
вертикальні стержні 	2...4	0,5	0,43	0,3	–	0,75
	8	0,7	0,55	0,4	0,3	
	15	0,8	0,7	0,55	0,4	
горизонтальні стержні 	2	0,65	0,55	0,45	0,4	1
	3	0,7	0,6	0,5	0,45	0,75

Опір одиночного заземлювача визначається за спрощеними залежностями.

– для вертикальної труби або стержня

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left[\frac{4 \cdot l \cdot (2 \cdot t + l)}{d \cdot (4 \cdot t + l)} \right]$$

– для горизонтальної штаби

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln \frac{1,5}{\sqrt{b \cdot t}}$$

– для залізобетонного фундаменту

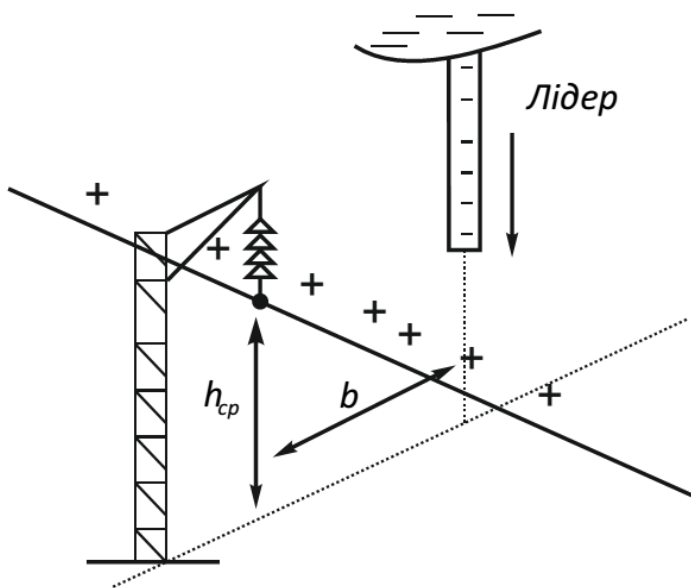
$$R = 1,7 \cdot \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot t} \cdot \ln \frac{4 \cdot t}{b} ,$$

де l – довжина труби або штаби; t – глибина залягання; b – ширина штаби або фундаменту; d – діаметр труби або стержня.

8.5 Індуковані перенапруги

Розряди блискавок в землю поблизу лінії електропередач або інших об'єктів викликають на них індуковані перенапруги.

Відбувається це таким чином. Електричне поле негативного лідера блискавки індукує на проводах позитивні заряди. Їх щільність максимальна на ділянці проводу, найближчому до каналу лідера.



Через відносно малу швидкість росту лідера індукований ім в лінію струм малий і потенціал проводу $u = i \cdot Z$ залишається близьким до нуля (без урахування робочої напруги), оскільки лінія зв'язана з землею через ємності, виточки і т.д.

Позитивні заряди в проводі утримуються електричним полем лідера. В стадії головного хвильового розряду утримуюче поле розпадається, індуковані заряди звільнюються і в обидва

боки поширюються хвилі індукованих перенапруг, а точніше їх електрична складова.

Крім електричної, існує магнітна складова індукованих перенапруг.

Розрядна хвиля каналу блискавок збуджує в навколишньому просторі змінне магнітне поле. Це поле викликає підтікання негативних зарядів до опори, тобто створює напругу $U_{\text{Инд.м}} = E_{\text{м}} \cdot h_{\text{пр}}$, яка впливає на ізоляцію опори.

Напругу $U_{\text{Инд.м}}$ називають магнітною складовою індукованої напруги.

На ізоляцію впливає сума електричної та магнітної складових

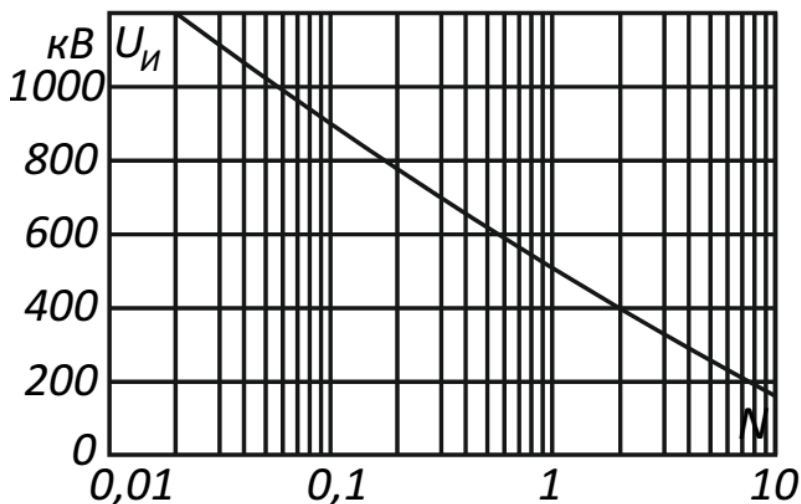
$$U_{\text{Инд}} = U_{\text{Изол}} = U_{\text{I.E}} + U_{\text{I.M}}$$

Вочевидь, що найбільші напруги на лінійній ізоляції виникають на опорах, найближчих до місця удару блискавки.

$$U_{\text{Инд}} = 30 \cdot I_{\text{Б}} \cdot h_{\text{ПР}} / b \quad ,$$

де $h_{\text{ПР}}$ – середня висота підвіски проводу, м; b – відстань до місця удару, м.

При індукованих перенапругах на небезпеку наражається, у першу чергу, ізоляція проводу відносно землі. Міжфазні перенапруги визначаються, в основному, різницею висот підвіски, оскільки хвилі поширюються по всіх трьох проводах практично однаково.



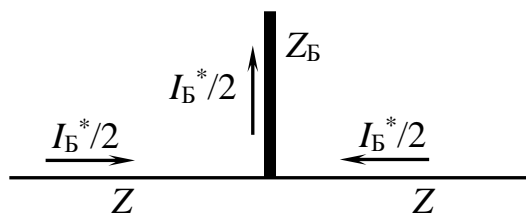
Крива ймовірності індукованих перенапруг для лінії $L = 100$ км; $h_{\text{ПР}} = 10$ м; $n_{\Gamma} = 30$.

Як видно з кривої, в більшості випадків індуковані перенапруги досягають 100...200 кВ, в рідких випадках – 500...600, тобто мають істотне значення для лінії 3...35 кВ.

8.6 Перенапруги ПУБ в ЛЕП без тросів у системі із заземленою нейтраллю

Системами із заземленою нейтраллю є системи 150...220 кВ і вище.

При влучанні блискавки безпосередньо в провід, в місці удару виявляється включеним опір



$$Z/2 \approx 200 \dots 250 \text{ Ом} \approx Z_{\text{Б}}$$

приблизно рівний хвильовому опору каналу блискавки. Отже, по проводу в кожну сторону від місця удару буде поширюватися хвиля зі струмом

$$I_{\text{Б}}^* = \frac{I_{\text{Б}} \cdot Z_{\text{Б}}}{Z_{\text{Б}} + Z/2} = \frac{I_{\text{Б}}}{2}$$

Ця хвиля створює перенапругу

$$U_{\text{ПР}} = \frac{I_{\text{Б}}^*}{2} \cdot Z = \frac{I_{\text{Б}}}{4} \cdot Z \approx 100 \cdot I_{\text{Б}}$$

пропорційну амплітуді струму блискавки.

Якщо розглядати лінію на металевих опорах, можна обчислити напругу, що прикладається до гірлянди ізоляторів

$$U_{I3} = U_{ПР} = 100 \cdot I_{Б}$$

Перекриття гірлянди відбудеться, якщо ця напруга перевищить імпульсну міцність ізоляції.

$$U_{ПР} \geq U_{I3} \quad ; \quad \text{т. е.} \quad 100 \cdot I_{Б} \geq U_{50\%} \quad ,$$

де $U_{50\%}$ – імпульсна розрядна напруга ізоляції.

Цій умові відповідає струм блискавки.

$$I = U_{50\%} / 100 \quad ,$$

який зазвичай називається захисним рівнем лінії.

В даному випадку можливість перекриття ізоляції визначається тільки одним параметром – амплітудою струму блискавки і практично не залежить від крутизни.

Ймовірність перекриття ізоляції при ударі блискавки буде дорівнювати ймовірності того, що амплітуда струму блискавки буде рівна або більше захисного рівня лінії

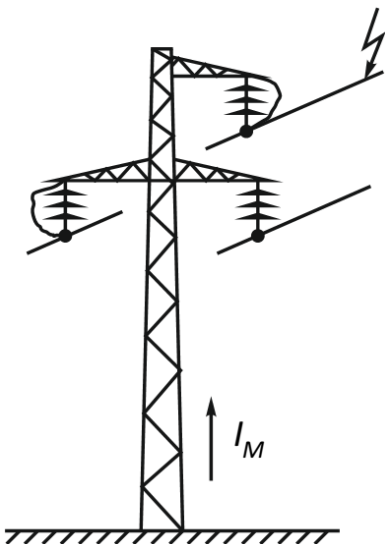
$$P_{ПЕР} = P_{I_{Б}} \geq I_{3}$$

Знаючи цю ймовірність неважко підрахувати число грозових вимкнень (число перекриттів ізоляції) на рік.

Наприклад, для лінії напругою 110 кВ, імпульсна міцність ізоляції якої $U_{50\%} = 650$ кВ, захисний рівень $I_{3} = 650/100 = 6,5$ кА, а число грозових вимкнень при $L = 100$ км і $n_{ч} = 90$, складає 30.

Таке число відключень звичайно є надмірно високим, тому лінії 110 кВ і вище на металевих або з/б опорах, навіть в районах з середньою грозовою інтенсивністю ($n_{ч} = 30$), не можуть працювати досить надійно. Тому такі лінії, як правило, обладнуються тросовим захистом.

8.7 Перенапруги ПУБ у ЛЕП без тросів у системі з ізолюваною нейтраллю



Зовсім інше положення має місце на лініях з ізолюваною нейтраллю (системи 6...35 кВ).

Удар блискавки в провід такої ЛЕП майже завжди призводить до перекриття однієї гірлянди ізоляторів (через низьку міцність ізоляції), після чого струм блискавки стікає в землю через ушкоджену гірлянду, стійку опори та її заземлювач.

Однак дуга однофазного замикання на землю, яке встановлюється на лінії, є слабкострумовою і не в змозі викликати відключення лінії (спрацьовування захисту). Крім того, через свою слабкострумість дуга однофазного замикання на землю є нестійкою і

згасає (самоліквідується при першому ж проходженні синусоїди струму КЗ через нуль), тобто захист не буде діяти і через короткочасність впливу струму однофазного замикання на землю.

Розглянемо можливість двофазного перекриття ізоляції та процеси, що при цьому виникають.

При однофазному перекритті в шлях струму блискавки замість хвильового опору проводу Z включається значно менший опір (опір заземлення плюс опір опори).

Тоді, вершина опори і уражений провід набудуть потенціал

$$U_{\Pi} = I_{\text{Б}} \cdot R$$

При цьому на сусідньому проводі наводиться напруга

$$U_{\text{зд}} = k \cdot I_{\text{Б}} \cdot R \quad ,$$

де k – коефіцієнт зв'язку проводів.

На ізоляцію здорового проводу буде впливати різниця напруг здорового і ураженого проводів.

$$U_{\text{ІЗ}} = I_{\text{Б}} \cdot R - I_{\text{Б}} \cdot R \cdot k = I_{\text{Б}} \cdot R \cdot (1 - k)$$

Перекриття ізоляції другого проводу відбудеться, якщо

$$U_{\text{ІЗ}} \leq U_{50\%} \quad U_{50\%} \leq I_{\text{Б}} \cdot R \cdot (1 - k) \quad ,$$

тобто це відбудеться при ударі блискавки з амплітудою струму, що перевищує захисний рівень лінії.

$$I_{\text{Б}} \geq I_{\text{з}} = \frac{U_{50\%}}{R \cdot (1 - k)}$$

Наприклад, ЛЕП-35 кВ з міцністю ізоляції $U_{50\%} = 350$ кВ, опором заземлення $R = 10$ Ом при коефіцієнті зв'язку $k = 0,3$, має захисний рівень

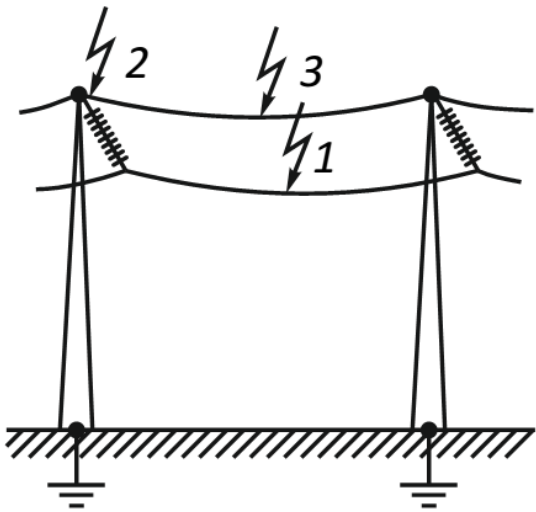
$$I_{\text{з}} = \frac{350}{10 \cdot (1 - 0,3)} = 50 \quad \text{кА}$$

Це дає при $n_{\text{ч}} = 90$ три відключення на рік на 100 км довжини лінії.

Як видно з прикладу, число відключень лінії в дуже сильному ступені залежить від опору заземлення опор. Тому на лініях 35 кВ металеві опори заземлюються влаштуванням спеціальних штучних заземлювачів.

8.8 Перенапруги ПУБ в ЛЕП з тросовим захистом

Розглянемо випадок (2) удару блискавки в трос біля опори або у вершину опори з тросами. У місці удару струм блискавки розгалужується,



причому більша його частина стікає в землю через заземлювач ураженої опори, а менша частина проходить по тросу (тросах), прямуючи до заземлювачів сусідніх опор.

При косокутному фронті хвилі ($i_B = a \cdot t$), напруга на ізоляції ураженої опори

$$u_{B(t)} = i_{OP} \cdot R + \frac{di_{OP}}{dt} \cdot L_{OP} + U_M + U_{IE} - k \cdot u_{TP} \quad ,$$

де i_{OP} – складова струму блискавки в опорі; L_{OP} – індуктивність опори; R – опір опори та заземлення; u_{TP} – напруга в грозозахисному тросі; U_M – магнітна складова індукованих перенапруг; U_{IE} – електрична складова індукованих перенапруг.

Як показує аналіз, перекриття ізоляції можливо тільки на фронті хвилі, оскільки в подальшому напруга по ізоляції знижується.

Таким чином, при ударі блискавки в опору лінії з тросами перекриття ізоляції визначається як амплітудою, так і крутістю струму блискавки. Для визначення ймовірності перекриття необхідно знати ймовірність поєднання обох параметрів блискавки.

Отримання кривої небезпечних параметрів є важким завданням, тому користуються наближеним методом.

Наявність індукованих перенапруг враховують збільшенням значення опору опори.

Тоді захисний рівень лінії із тросами можна визначити

$$I_3 = \frac{U_{50\%}}{R + \delta \cdot h} \quad ,$$

де δ – коефіцієнт, що враховує індуквані перенапруги у функції від висоти опори ($\delta = 0,15$ – для ліній з двома тросами; $\delta = 0,3$ – для ліній з одним тросом).

Ймовірність перекриття ізоляції визначається по захисному рівню звичайним способом.

Розглянемо випадок (3) удару блискавки в середину прольоту троса.

Напруга тросу в момент удару блискавки

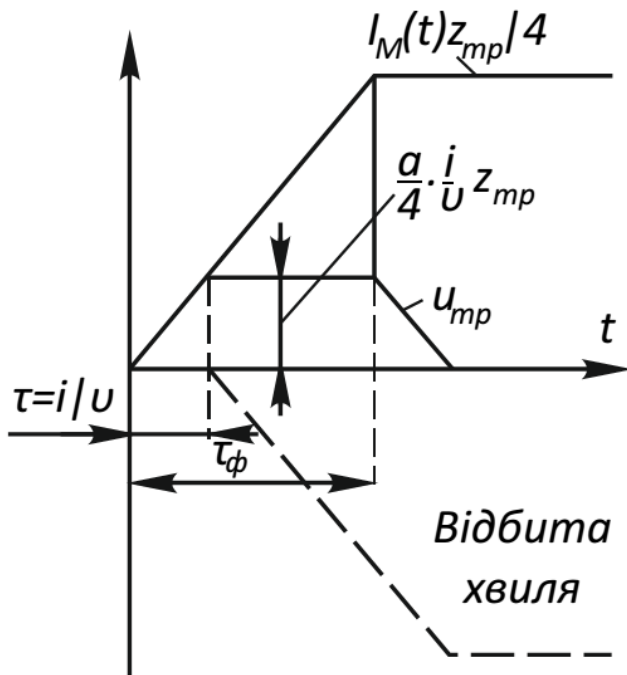
$$u_{TP} = (i_B/2) \cdot (Z_{TP}/2)$$

для косокутної хвилі $i_B = a \cdot t$

$$u_{TP} = a \cdot t \cdot Z_{TP}/4$$

Отже напруга в місці удару блискавки залежить тільки від крутості струму блискавки і не залежить від його амплітуди.

Хвиля струму блискавки не відбивається в місці удару, а поширюється до опор, відбивається від них, повертається та складається в місці удару блискавки з падаючою хвилею.



Максимальна напруга троса

$$U_{ТР.МАКС} = \frac{a}{4} \cdot Z_{ТР} \cdot \frac{l}{v}$$

Під дією цієї хвилі в провід наводиться напруга

$$u_{ПР} = k \cdot u_{ТР} ,$$

де k – коефіцієнт зв'язку між проводом і тросом в середині прольоту (з урахуванням поправки на корону).

Якщо прийняти $Z_{ТР} = 400 \text{ Ом}$ і $v = 300 \text{ м/хв}$, напруга, прикладена до повітряного проміжку трос-провід в середині прольоту визначається

$$U_{ІЗ} = (1 - k) \cdot a \cdot l/3$$

Умова перекриття ізоляції

$$U_{ІЗ} = (1 - k) \cdot a \cdot l/3 \geq 750 \cdot S ,$$

де 750 кВ/м – імпульсна міцність повітря в проміжку трос-провід.

Рішення останнього виразу відносно a дозволить визначити припустиме значення крутості струму

$$a_{кр} \geq \frac{2250 \cdot S}{(1 - k) \cdot l}$$

Імовірність перекриття повітряного проміжку трос-провід визначається як імовірність появи блискавки з крутістю $a_{кр}$.

$$P_{ПЕР} = P_{акр}$$

На практиці намагаються витримувати такі відстані S , при яких імовірність перекриття ізоляції не перевищує $0,3\%$ (тобто зневажливо мала), оскільки з точки зору танцю проводів і тросів ці відстані досить великі.

З цієї причини перекриття в прольоті відбуваються дуже рідко, а відключення ліній ще рідше, в силу малої ймовірності переходу імпульсного перекриття в силову дугу.

Перекриття гірлянди при ударі в проліт ще менш ймовірно, оскільки струм блискавки ділиться між опорами навпіл, а індуковані перенапруги малі.

9 Грозозахист ЛЕП і споруд

9.1 Принцип дії. Загальні вимоги до розрядників

З розгляду ударів блискавки в ЛЕП випливає, що в ряді випадків на проводах лінії виникають імпульсні електромагнітні хвилі, викликані атмосферними явищами. Ці хвилі можуть становити небезпеку як для ізоляції ліній електропередач, так і (в першу чергу) для електроустаткування підстанцій.

Найпростішим пристроєм, що знижує амплітуду хвиль перенапруг в лініях електропередач, є розрядник.

Розрядник являє собою іскровий повітряний проміжок, включений паралельно ізоляції, яка захищається (як лінії, так і підстанції).

До будь-якого розрядника пред'являються наступні *основні вимоги*:

1. Для надійного захисту ізоляції ординати вольт-секундної характеристики розрядника повинні бути на 15...20% менше (нижче) складових ординат ВСХ ізоляції, тобто розрядна напруга ізоляції завжди має бути вище напруги спрацьовування розрядника.

$$U_{50\% \text{ РОЗР}} \leq U_{50\% \text{ ІЗОЛ}} / 1,2$$

2. Вольт-амперна характеристика розрядника повинна наближатися до прямокутної, тобто напруга на розряднику після пробою не повинна зростати зі збільшенням струму (блискавки).

3. Розрядник повинен забезпечувати гасіння дуги при першому проходженні через нуль синусоїди супровідного струму.

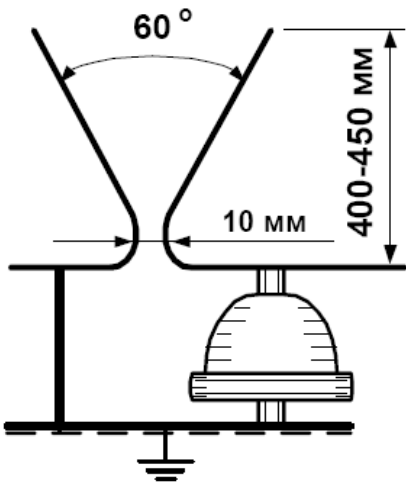
Справа в тому, що іскровий проміжок струму розрядника встановлюється таким, щоб він не перекривався під дією робочої напруги у всіх режимах роботи мережі.

Однак вже запалена дуга утримується в повітряному проміжку при значному зниженні напруги живлення. З цієї причини імпульсна дуга, що виникла в розряднику під впливом грозової перенапруги, не гасне відразу ж після закінчення імпульсу, а підхоплюється робочою напругою. З цього моменту в мережі встановлюється режим однофазного замикання на землю (якщо спрацьовує 1 розрядник), режим 2-х або 3-х фазного замикання на землю. Струми, що протікають через розрядник в цьому режимі називаються *супроводжувачими*. Це струми промислової частоти, що протікають під впливом робочої напруги. Як правило, це струми короткого замикання. Вони дуже великі та викликають спрацьовування захисту, тобто відключення лінії, підстанції і т.д.

При проходженні через нуль синусоїди цього струму створюються сприятливі умови гасіння дуги. Якщо це гасіння відбудеться, захист спрацювати не встигне і лінія не буде відключена.

9.2 Устрій і характеристики розрядників

9.2.1 Прості захисні проміжки (ПЗ)



Їх електроди володіють різконеоднорідним полем, отже, їх вольт-секундні характеристики мають крутий підйом в області малих значень часу. Тому погано захищають ізоляцію та вимагають великого запасу її електричної міцності.

Вольт-амперна характеристика ПЗ лінійна, напруга на розряднику дуже змінюється при зростанні струму крізь нього.

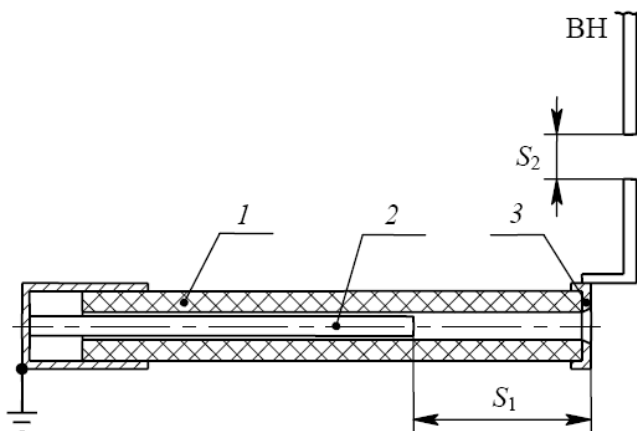
Спрацьовування ПЗ приводить, як правило, до однофазного замикання на землю (однофазне КЗ при заземленій нейтралі) або 2-х чи 3-х фазного замикання на землю (2-х або 3-х фазне КЗ). Дуга цього замикання не самоліквідується і горить до спрацьовування захисту, тобто число відключень велике.

П.З. мають низькі захисні проміжні характеристики, але дуже прості, дешеві та не мають обмежень по потужності.

Тому захисні проміжки рекомендується застосовувати при відсутності необхідних розрядників, в спрощених схемах грозозахисту і тільки на тих ділянках, які обладнані пристроями АПВ.

9.2.2 Трубчасті розрядники (РТ)

Відрізняються від захисних іскрових проміжків насамперед тим, що вони самостійно гасять дугу, яка виникає між їх електродами протягом короткого часу, меншого часу дії релейного захисту. Завдяки цьому лінії при роботі РТ не відключаються.



- S_1 – основний проміжок;
- S_2 – зовнішній іскровий проміжок;
- 1 – трубка, яка генерує газ;
- 2 – стержневий електрод;
- 3 – відкритий електрод.

Трубчастий розрядник так само включається між проводом і землею. Один його електрод (лівий на малюнку) заземлюється, а інший підключається до проводу, але не шляхом приєднання, а через невеликий зазор, так званий зовнішній іскровий проміжок. Таким чином, РТ має два іскрових проміжки:

внутрішній, який є основним і визначає роботу розрядника та зовнішній, який служить для запобігання витоків по поверхні розрядника.

При набіганні хвилі відбувається пробій обох проміжків, слідом за чим в розряднику встановлюється дуга супровідного струму. Вона викликає нагрів газогенеруючої трубки та виділення великої кількості газів, тиск яких досягає 10 атм. Гази з великою швидкістю виходять з розрядника, утворюючи інтенсивне поздовжнє дуття, і забезпечують гасіння дуги при переході супровідного струму через нульове значення.

Величина внутрішнього проміжку встановлюється у відповідності з дугогасними властивостями розрядника і, як правило, не підлягає регулюванню. Зміна розрядної напруги (невелика) здійснюється зовнішнім проміжком.

Для успішного гасіння дуги необхідно досить інтенсивне газоутворення, яке залежить від величини струму, який проходить через розрядник.

Трубчасті розрядники вибираються за номінальною напругою та інтервалом супроводжуваних струмів

$$I_{с.ВЕРХ} \geq k \cdot I_{к.МАКС} \quad I_{с.НИЖН} \leq I_{к.МИН} ,$$

де $I_{с.НИЖН}$, $I_{с.ВЕРХ}$ – межі супроводжуваних струмів розрядника; $I_{к.МАКС}$ – діюче значення періодичної складової струму КЗ в місці встановлення розрядника при найбільш несприятливих умовах (три- або однополюсне КЗ); $I_{к.МИН}$ – найменше можливе значення періодичної складової струму КЗ в місці установки розрядника при двофазному замиканні в системі з ізольованою нейтраллю і одно- або трифазному при заземленій нейтралі; k – коефіцієнт, що враховує аперіодичну складову.

Максимальний струм відповідає умові включення всіх встановлених елементів мережі, а мінімальний – схемі мережі з частково вимкненими елементами (генератор, трансформатор, лінія). При максимальному струмі також повинна враховуватися аперіодична складова. Коефіцієнт k приймається рівним 1,3...1,8.

Електричні параметри деяких типів трубчастих розрядників

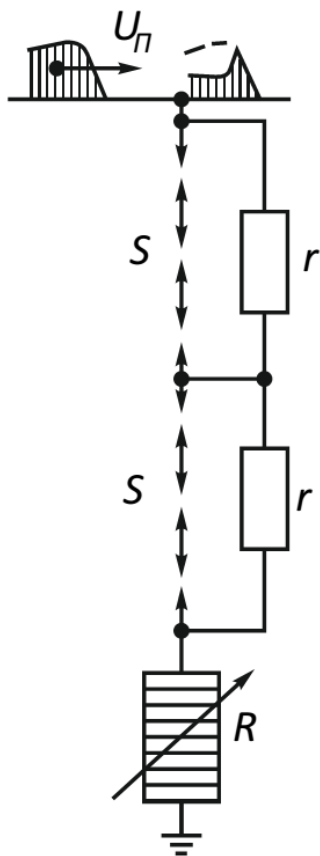
Тип розрядника	$U_{50\%}$ (1,5/40)	$U_{50Гц}$	
		$U_{сух}$	$U_{МОКР}$
РТФ 6/0,3-7	61	42	39
РТФ 35/0,8-5	180	105	65
РТВ 110/2-10	380	165	100
	460	395	215

РТ приєднуються до заземлення тієї опори, на якій вони встановлені. В процесі експлуатації трубка розрядника вигорає, у зв'язку з чим збільшуються межі струмів, які відключаються. Припустиме збільшення внутрішнього діаметра трубки – 20...40 %.

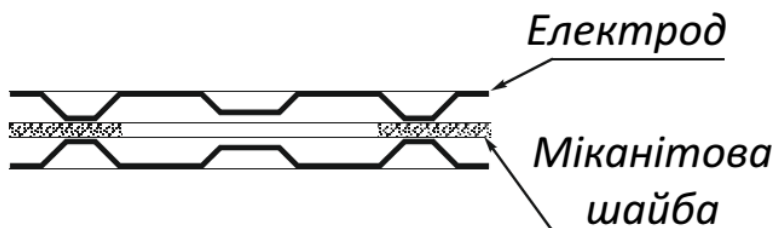
У зв'язку з тим, що трубчасті розрядники мають незадовільні захисні характеристики, а також через обмежене число надійних спрацьовувань,

трубчасті розрядники застосовуються для захисту ослаблених місць на лініях електропередач, захисних проводів до підстанцій, а також у якості самостійних пристроїв захисту підстанцій в спрощених схемах.

9.2.3 Вентильні розрядники (РВ)



Основними елементами вентильного розрядника є багаторазовий іскровий проміжок та нелінійний робочий опір.



Розрядник включається між проводом і землею. При набіганні хвилі, амплітуда якої перевершує імпульсну пробивну напругу іскрового проміжку, відбувається його пробій та імпульсний струм відводиться через робочий опір в землю. Потім через розрядник проходить супроводжуючий струм, дуга якого гаситься при його проходженні через нуль. Гасіння струму полегшується розбиттям дуги на ряд коротких дуг по числу одиничних проміжків. Для рівномірного розподілу напруги по одиничним проміжкам останні шунтуються високоомними опорами.

У вентильних розрядниках РВС та РВП можуть надійно гаситися струми до 80...100 А. Обмеження супроводжуючих струмів до цих значень здійснюється робочими опорами, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику.

Багаторазовий іскровий проміжок забезпечує сприятливу (пологу) вольт-секундну характеристику розрядника. Пояснюється це тим, що електричне поле між електродами близьке до рівномірного, а в шарі повітря між міканітом і електродом відбувається посилена іонізація, що забезпечує пробій проміжку з рівномірним полем при малому часі запізнювання, тому коефіцієнт імпульсу дорівнює 1.

Таким чином, перевагами вентильного розрядника в порівнянні з трубчастим є: пологий характер вольт-секундної характеристики, надійне гасіння супроводжуючого струму, а також багатократність дії.

Вентильний розрядник є основним засобом боротьби з хвилями, що набігають.

Для того, щоб вентильний розрядник забезпечував відповідний захист, імпульсний струм через нього не повинен перевищувати струм координації.

Якщо струм (блискавки, імпульсний струм) перевищить струм координації, то відповідно до ВАХ розрядника на ньому виявиться

вище нормованої, що може становити небезпеку для ізоляції. В окремих випадках при великих токах (десятки кілоампер) та багатократних ударах розрядник може зруйнуватися.

Щоб запобігти цього, в першу чергу, необхідно виключити ПУБ в проводи лінії поблизу підстанції.

При близьких ударах блискавки її струм розподіляється обернено пропорційно опорам заземлення опори і вентиляного розрядника.

Приклад: для підстанції 110 кВ застосовується РВ-110 з $I_{\text{доп}} = 10$ кА та $U_{\text{ост}} = 360$ кВ.

Опір розрядника в цьому режимі

$$R_p = 360 / 10 = 36 \text{ Ом}$$

При струмі блискавки $I_B = 100$ кА і опорі заземлення опори $R_3 = 10$ Ом через розрядник потече струм

$$I_p = 100 \cdot 10 / (10 + 36) = 20 \text{ кА}$$

Така величина струму для розрядника є неприпустимою з двох причин: через небезпеку пробою ізоляції (напруга на розряднику перевищує ту, що залишається) та через можливість руйнування розрядника.

Для зниження цієї небезпеки прагнуть запобігти ПУБ в провід ЛЕП поблизу підстанції, влаштовуючи для цього так звані *захисні підходи*.

За таких умов близькі удари блискавки виключені, а віддалені призводять до появи в розряднику струмів, обмежених хвильовим опором лінії та імпульсної міцністю її ізоляції ($U_{50\%}$). Захисна дія розрядника виявляється залежною від відстані між ним та ізоляцією, що захищається.

9.2.4 Нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН)

Основним недоліком вентиляного розрядника є порівняно невисока нелінійність резисторів на основі карбїду кремнію. Значно більшою нелінійністю володіють резистори на основі окису цинку. Виконані на їх базі ОПН дозволяють обмежувати комутаційні перенапруги на рівні $(1,65..1,8) \cdot U_{\text{ф}}$, а грозіві – на рівні $(2,2..2,4) \cdot U_{\text{ф}}$.

Високонелінійні окисно-цинкові резистори випускаються у вигляді дисків діаметром від 28 до 85 мм. ОПН виконується шляхом послідовного і паралельного включення таких резисторів. При робочій напрузі через одну паралельну колонку резисторів протікає струм в частки міліампера, і необхідність в іскровому проміжку відпадає.

Захисна функція ОПН характеризується величиною напруги, яка залишається, при певній величині струму, що протікає, комутаційної або грозової перенапруги. Поняття напруги гасіння у обмежувачів немає, проте є найбільша робоча напруга ОПН, вище якої може статися розігрів і його

руйнування. Окрім того, ОПН характеризують величиною номінальної напруги, яка вказується в маркуванні.

Обмежувачі перенапруг, які випускаються, по висоті близькі до опорних ізоляційних конструкцій відповідного класу напруги, тому їх можна використовувати на підстанціях в якості таких конструкцій та як опорні колони роз'єднувачів. Таким чином, їх застосування може спричинити суттєве скорочення габаритів ЗРП.

9.3 Захист повітряних ЛЕП

Лінії 3...10 кВ на металевих і з/б опорах мають досить низький захисний рівень, який визначається тільки електричними характеристиками ізоляторів.

Число перекриттів ізоляції завелике. Для забезпечення безперебійності роботи ліній потрібне застосування пристроїв АПВ.

Кабельні вставки на ПЛ 6...10 кВ з двох сторін захищаються трубчастими або вентиляними розрядниками.

Лінії 35 кВ на металевих і ж / б опорах мають достатній захисний рівень (за рахунок ізолюваної нейтралі та малу ймовірність переходу імпульсного перекриття в силову дугу).

Для таких ліній обов'язкове надійне заземлення опор (опір до 10 Ом при питомому опорі ґрунту до 100 Ом·м і не більше 30 Ом при $\rho > 1000$ Ом·м).

В окремих випадках лінії можуть захищатися тросами.

Лінії 110 кВ на металевих опорах мають велике число відключень і тому в районах з середньою та високою інтенсивністю грозової діяльності навішення тросів обов'язкове.

При цьому забезпечують захисний кут 30° (один трос) і 15° (допускається 30°) для лінії з двома тросами. Всі опори з тросом заземлюються (10 Ом).

Допускається експлуатація ліній 110 кВ з металевими та з/б опорами без тросової захисту:

- в районах зі слабкою грозовою діяльністю;
- в районах з високим опором ґрунтів ($\rho \geq 1000$ Ом·м);
- в районах з інтенсивною ожеледдю.

Наявність АПВ для ЛЕП-110 кВ без тросового захисту обов'язкове.

Лінії 150, 220 кВ та вище завжди обладнуються тросовим захистом. Кріплення троса на опорах здійснюється через ізолятор, який шунтується іскровим проміжком 40 мм.

На кожній анкерній ділянці довжиною до 10 км трос заземлюють спеціальною перемичкою на анкерній опорі. При більш довгих анкерних ділянках заземлення троса виконується і всередині прольоту.

ЛЕП-220 кВ на підході до підстанції повинні бути обладнані заземленням троса на кожній опорі.

Лінії до 1 кВ в населених пунктах з одноповерховою забудовою. Якщо ці лінії екрановані високими будинками, трубами, деревами вони повинні мати заземлення крюків або штирів всіх фазних проводів і нульового проводу. Заземлення улаштовується на опорах з відгалуженнями до будинків або безпосередньо на уводах.

При цьому опір заземлюючого пристрою повинен бути не більше 30 Ом, а відстань між ними 100...200 м.

Заходи грозозахисту перетинів не застосовуються при відстанях між проводами ліній, що перетинаються, не менше:

ПЛ-1, кВ	ПЛ-2, кВ	Відстань, м
6...10	6...10 и ЛЗ	4
35	35	5
35...110	6...10 и ЛЗ	5
150...220	6...10 и ЛЗ	6

9.4 Захист будівель і споруд від ПУБ

Виробничі, житлові та громадські будівлі і споруди промислових підприємств в залежності від їх призначення, конструктивного виконання, географічного розташування, пов'язаного з інтенсивністю грозової діяльності та очікуваної кількості ураження їх блискавкою, повинні бути забезпечені блискавкозахистом.

Він виконується відповідно до категорій:

I категорія – будівлі та споруди, в яких виділяються горючі гази або пари ЛЗР, які можуть утворювати вибухонебезпечні суміші при нормальних режимах роботи;

II категорія – будівлі та споруди або їх частини, в яких виділяються горючі гази або ЛЗР, що можуть утворювати вибухонебезпечні суміші в результаті аварій або несправностей, а також простір у зовнішніх установок, що містять горючі гази або ЛЗР;

III категорія – пожежонебезпечні виробничі приміщення (в яких обертаються горючі пил, волокна і тверді речовини);

- пожежобезпечні, але недостатньо вогнестійкі будівлі та споруди
- димові труби і башти більше 15 м;
- житлові та громадські будівлі, які височать над іншими на 25 м і більше (в радіусі 400 м);
- окремо розташовані будинки заввишки 30 м (в радіусі 400 м);
- громадські будівлі III, IV і V ступенів вогнестійкості (дитячі садки, лікарні і т.д.);
- пам'ятки історії і культури.

Будинки і споруди I і II категорії захищаються від ПУБ, від електростатичної і електромагнітної індукції та занесення високих потенціалів через надземні та підземні металеві комунікації.

Будинки I категорії обладнуються окремо розташованими блискавковідводами, всі підземні та надземні цехові комунікації приєднують до спеціального протяжного заземлювача, який розташований за межами приміщення і має $R_3 \leq 10 \text{ Ом}$.

Будинки II категорії можуть захищатися блискавковідводами, конструктивно з'єднаними з самою будівлею.

Всі підземні та надземні внутрішньоцехові комунікації біля введів в приміщення приєднують до спеціального заземлювача.

Для приміщень I категорії передбачається кабельний увід напруги.

Захист від електричної індукції зазвичай виконують накладенням металевої сітки по покрівлі.

Будинки і споруди III категорії захищають від ПУБ і занесення високих потенціалів через надземні металеві комунікації. Опір розтіканню заземлювача повинен бути не більше 20 Ом.

У ряді випадків блискавкозахист будівель здійснюють металевою сіткою, покладеною на покрівлі та з'єднаною з заземлювачами.

При ширині будівель і споруд понад 100 м виконують заходи з вирівнювання потенціалу всередині будівлі, щоб уникнути пошкодження електроустановок та поразки людей при прямих ударах блискавки в будинок.

При наявності в будинку або споруді конструктивних елементів, які використовуються для захисту від блискавки (металеві ферми, колони і т.д.), окрім об'єднаного заземлювального пристрою інших заходів не потрібно.

9.5 Грозозахист підстанцій

Для більшості ліній електропередач допускається відносно велике число перекриттів ізоляції на рік. Така кількість пошкоджень ізоляції для підстанції абсолютно неприйнятна з наступних причин:

- перекриття ізоляції є коротким замиканням на шини, воно призводить до важких системних аварій;
- при перенапругах на підстанції може статися пробій внутрішньої ізоляції, яка має суттєво меншу електричну міцність, ніж лінійна.

У межі амплітуда хвиль, які набігають на підстанцію, наближається до величини розрядної напруги лінії відносно землі, оскільки більш високі хвилі будуть зрізані при перекритті лінійної ізоляції в міру руху хвилі. Електрична міцність лінійної ізоляції завжди вище випробувальної напруги обладнання підстанцій.

З цієї причини сучасні підстанції без спеціальних заходів захисту від хвиль напруг, що набігають не споруджуються.

9.5.1 Захист підстанцій від ПУБ

Усі ВРП 20 кВ і вище повинні бути захищені від ПУБ, крім малопотужних з трансформатором до 1600 кВА.

ВРП 20...35 кВ, як правило, захищається блискавковідводами, що стоять окремо; відстані до конструкцій повинні бути не менше 5 м, щоб уникнути зворотного перекриття.

Заземлення окремо розташованих блискавковідводів – індивідуальне з $R_3 \leq 80$ Ом.

Відстань в землі між контуром блискавковідводу на підстанції повинно бути не менше 3 м.

Якщо опір ґрунту невеликий (до 500 Ом·м) блискавковідвід може бути встановлений і на трансформаторному порталі, однак при цьому необхідно забезпечити опір заземлення в місці його приєднання не більше 4 Ом.

Захисний підхід ліній 35 кВ, як правило, не підключається до конструкцій РП.

Останній проліт ПЛ повинен входити в захисну зону підстанції.

При $\rho < 750$ Ом·м захисний підхід може підключатися до конструкцій РП. При цьому найближча до підстанції опора ЛЕП повинна мати опір, що не перевищує 10 Ом.

Від стійок ВРП, до яких прикріплений трос ЛЕП має відходити 2...3 магістрами заземлення (2...3 напрямки).

Крім того, повинно бути встановлено 2...3 вертикальні електроди довжиною 3...5 м.

ВРП 110 кВ і вище захищається блискавковідводами, встановленими безпосередньо на металевих або залізобетонних конструкціях.

Тросові блискавковідводи приєднуються до конструкцій ВРП.

Від стійок ВРП з блискавковідводами має бути забезпечено розтікання струму блискавки по магістралях заземлення не менше, ніж в 2...3 напрямках. Крім того, додаються 1...2 вертикальні електроди.

Якщо блискавковідвід встановлюється на трансформаторному порталі або поблизу його (менше 15 м по магістралі заземлення), потрібно:

- питомий опір ґрунту $\rho \leq 350$ Ом·м;
- на всіх виводах трансформатора – вентиляльні розрядники;
- розтікання струму блискавки від стійки конструкції з блискавковідводом по 3...4 магістралях.

ЗРП, а також інші приміщення та споруди на території підстанції захищаються або заземленням металевого даху чи з/б конструкцій, або блискавковідводами (якщо будинок не потрапляє в зону захисту ВРП).

9.5.2 Розрахункові параметри хвиль. Показник грозоупорності підстанцій

Граничні амплітуди хвиль, що впливають на підстанцію, визначаються імпульсною міцністю ізоляції лінії відносно землі в межах захисного підходу.

Що стосується форми хвилі напруги, вона залежить від цілого ряду обставин, тому при аналізі грозозахисту підстанцій зазвичай виходять з наступних припущень, що спрощують та дають запас надійності:

1. Всі розряди блискавки призводять до появи на проводі такої напруги, що дійшовши до підстанції хвиля матиме амплітуду, яка дорівнює мінімальній імпульсній розрядній нарузі ізоляції – $U_{50\%}$.
2. Всі удари блискавки призводять до появи на проводі в місці удару хвилі з прямовисним фронтом.

Ефективність захисту підстанції від імпульсів грозових перенапруг, що набігають з ЛЕП, характеризується середнім числом небезпечних перенапруг β_1 , які виникають на підстанції за рік.

Іноді з метою спрощення і здешевлення захисту влаштовують захисні підходи меншої довжини l (менше небезпечної зони $x_{кр}$). В цьому випадку головну небезпеку представляють удари блискавки у незахищену ділянку довжиною $x_{кр} - l$.

Ефективність захисту підстанцій від грозових перекриттів при ударі блискавки безпосередньо в підстанцію, характеризується середньою річною кількістю перекриттів ізоляції β_2 внаслідок проривів блискавки в зону захисту і зворотних перекриттів при ударах в блискавковідводи.

Імовірність ушкодження ізоляції підстанції в результаті всіх видів атмосферних перенапруг оцінюється показником грозоупорності підстанції, який дорівнює розрахунковому числу років, протягом яких не виникає небезпечної для ізоляції напруги

$$T = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2}$$

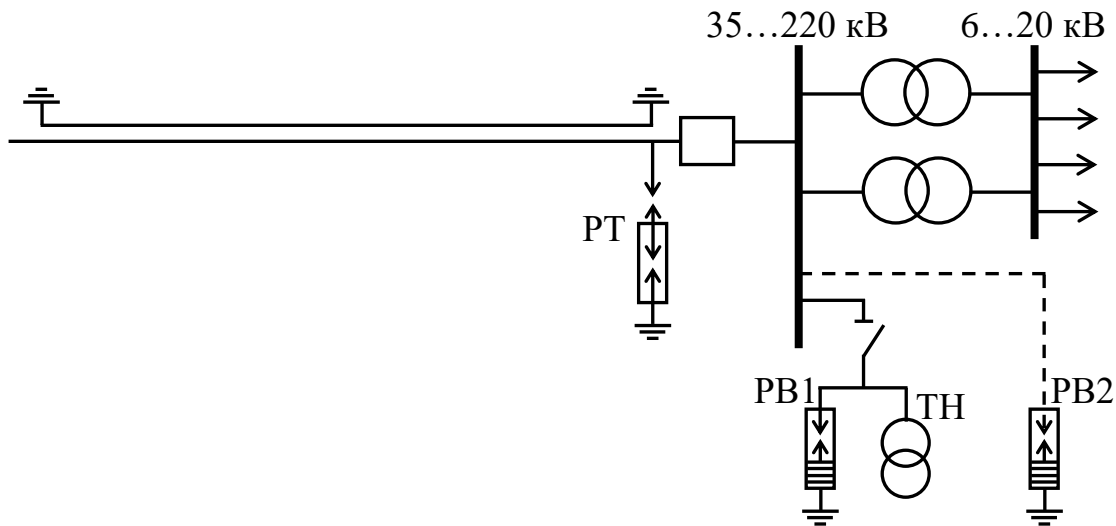
Заходи щодо захисту підстанції від перенапруг вважаються достатніми, якщо показник грозоупорності становить 100 і більше років.

10 Схеми грозозахисту підстанцій від хвиль, що набігають з ЛЕП

10.1 ГЗП 35...220 кВ

10.1.1 Лінії без тросового захисту на металевих опорах

Головним елементом є вентиляльний розрядник РВ1, приєднаний під один роз'єднувач разом з трансформатором напруги.



При великому віддаленні розрядника на затискачі трансформатора встановлюють додатковий розрядник РВ2.

Підходи ПЛ захищають тросами.

В кінці тросових ділянок встановлюються трубчасті розрядники РТ.

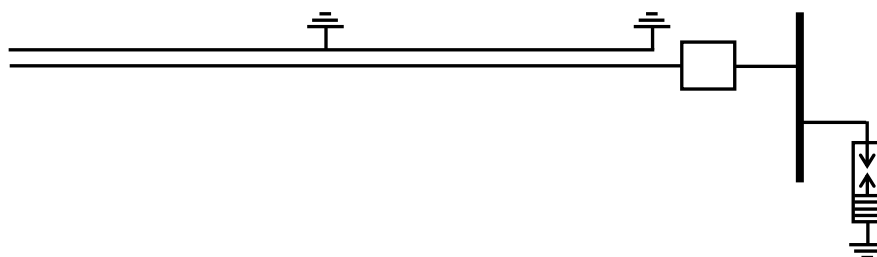
Довжина захисних підведень – 1 км для ліній напругою 35 кВ та 1...2 км для 110 кВ.

Якщо лінія проходить по забудованій місцевості та екранується існуючими будівлями і спорудами, тросовий захист не виконується.

Трубчастий розрядник відводить більшу частину струму блискавки в землю та забезпечує працездатність вентильного розрядника. Спрацьовування РТ рівнозначно (при імпульсному струмі 5 кА) обмеженню амплітуди хвиль, що набігають до рівнів 1070 кВ при 35 кВ і 1180 кВ при 110 кВ.

10.1.2 Лінії з тросовим захистом по всій довжині

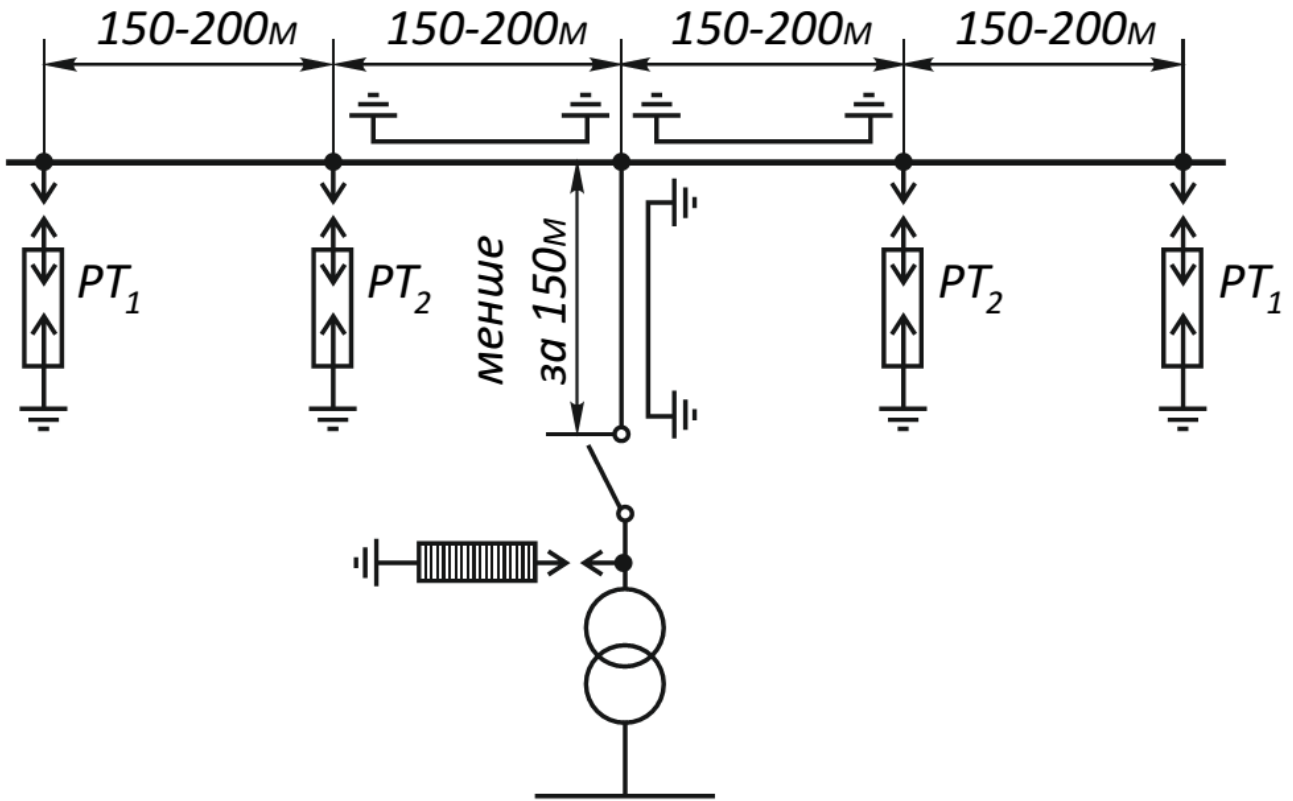
Мають більш просту схему грозозахисту.



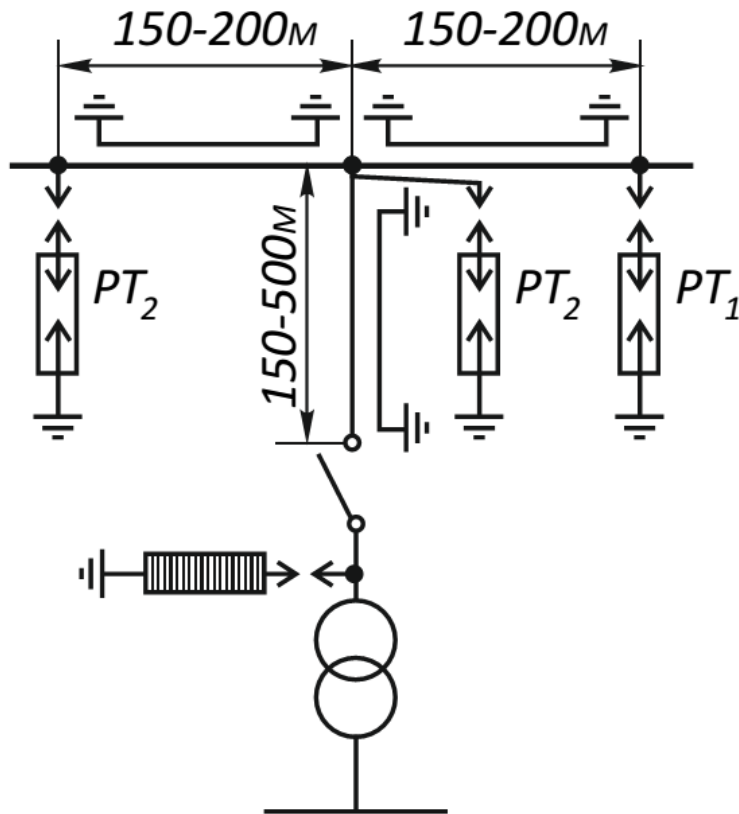
10.1.3 ГЗП 35...110, виконані за спрощеною схемою при підключенні до діючих ліній

Захист підстанцій, що підключаються до діючих ліній (за допомогою відпайок) проводиться за спрощеними схемами.

– при довжині відпайки до 150 м, діюча лінія без троса (до 40 МВА)



– при довжині відпайки до 500 м, діюча лінія без троса (до 40 МВА)



– якщо діюча лінія має тросовий захист по всій довжині, то відгалуження або захід виконуються також з тросовим захистом.

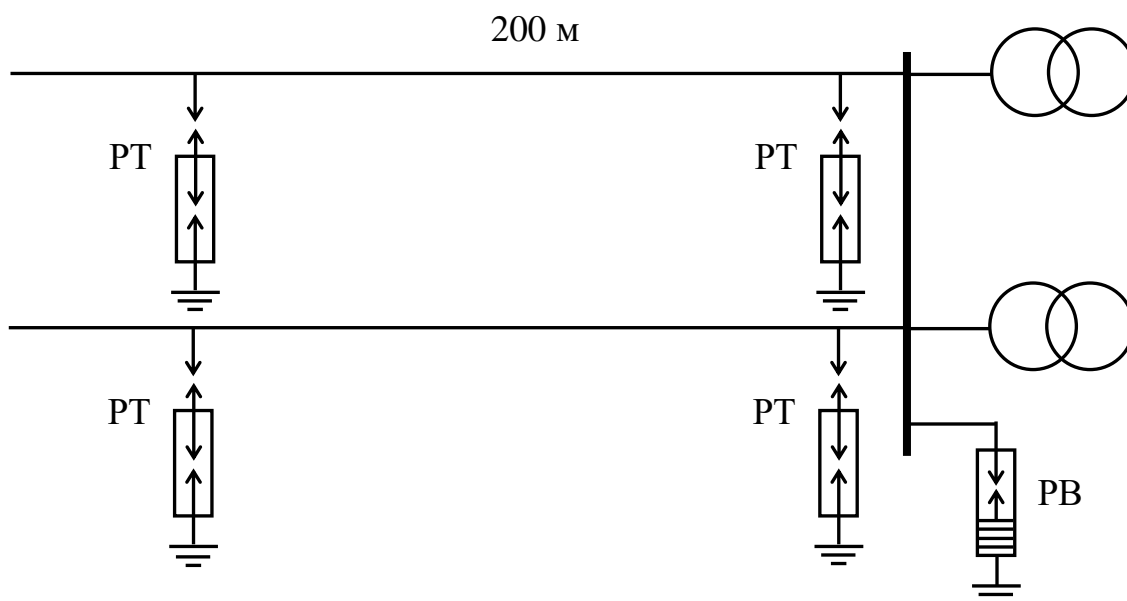
10.2 Цехові підстанції

Цехові підстанції виконуються на напругу 35, 3...6...10 кВ та є менш відповідальними об'єктами, ніж ГЗП.

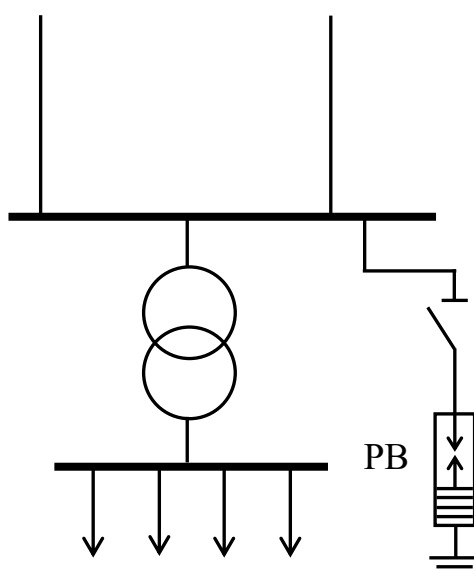
Вони живляться по коротких лініях електропередач, які часто проходять по забудованій місцевості.

З цієї причини цехові підстанції захищаються за спрощеними схемами.

10.2.1 Цехові знижувальні підстанції глибокого уводу 35 кВ з трансформаторами до 630 кВА

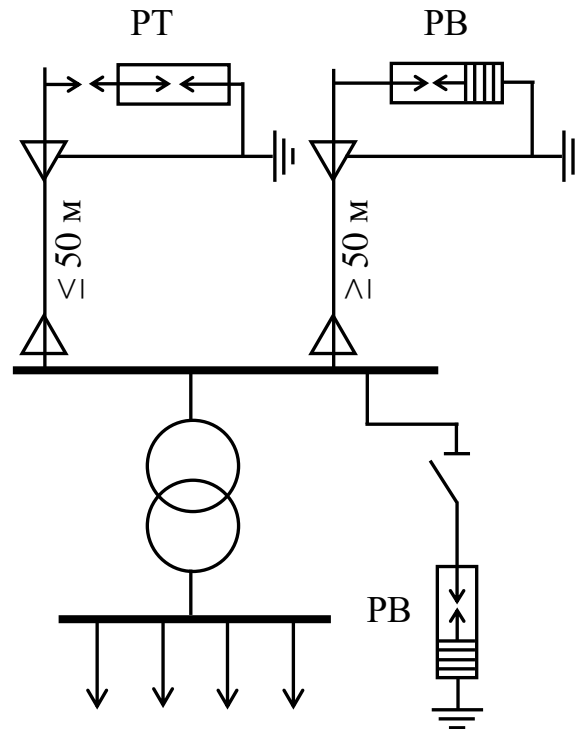


10.2.2 Цехові трансформаторні підстанції та РП з повітряними лініями, що живлять (6...10 кВ)



На підходах лінії з металевими або залізобетонними опорами необхідно їх заземлити на ділянці в 200...300 м.

10.2.3 Цехові трансформаторні підстанції та РП з повітряними лініями, що живлять через кабельні вставки



10.3 Грозазахист обертових машин

Грозазахист ОМ в основному здійснюється так само, як і підстанцій, але ізоляція машин має значно меншу імпульсну міцність, ніж ізоляція трансформаторів.

Навіть спеціальні типи розрядників з магнітним гасінням дуги забезпечують перевищення міцності ізоляції по відношенню до залишкової напруги на розряднику всього на 5...10 %.

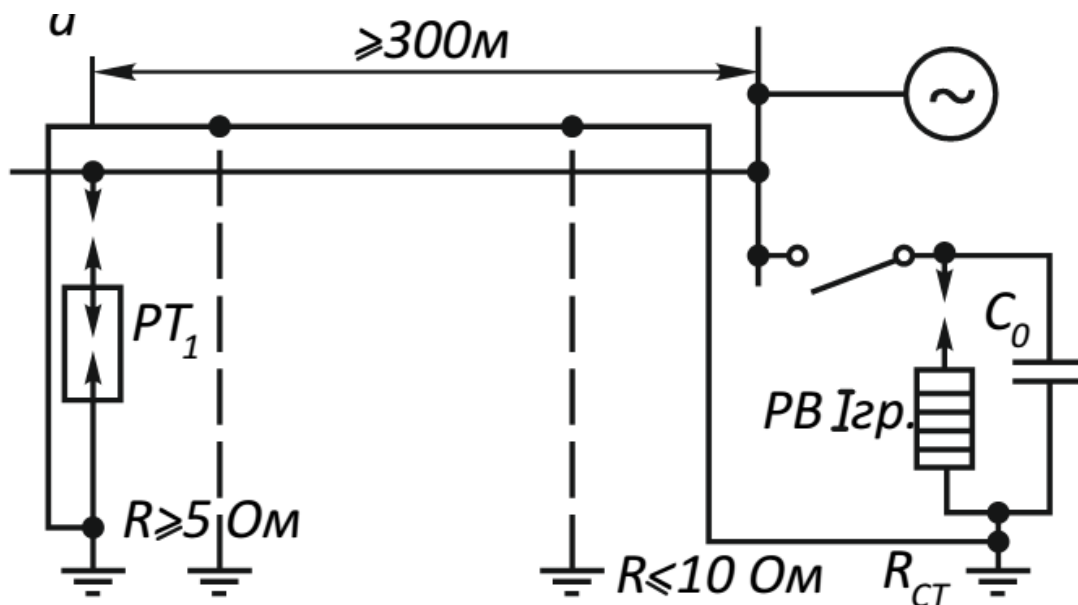
Генератори, з'єднані з повітряними лініями за допомогою трансформаторів, не потребують ніякого додаткового захисту від атмосферних перенапруг і на генераторній напрузі вентильні розрядники можуть не встановлюватися.

Грозазахист ОМ, з'єднаних безпосередньо з повітряними лініями має такі особливості:

1. На шинах встановлюється вентильний розрядник спеціального типу з магнітним гасінням дуги.
2. Коли лінія проходить по відкритій місцевості, підхід повинен бути захищений тросовими або стержньовими блискавковідводами.
3. Для обмеження крутості напруги на затискачах генератора на шинах встановлюється ємність.

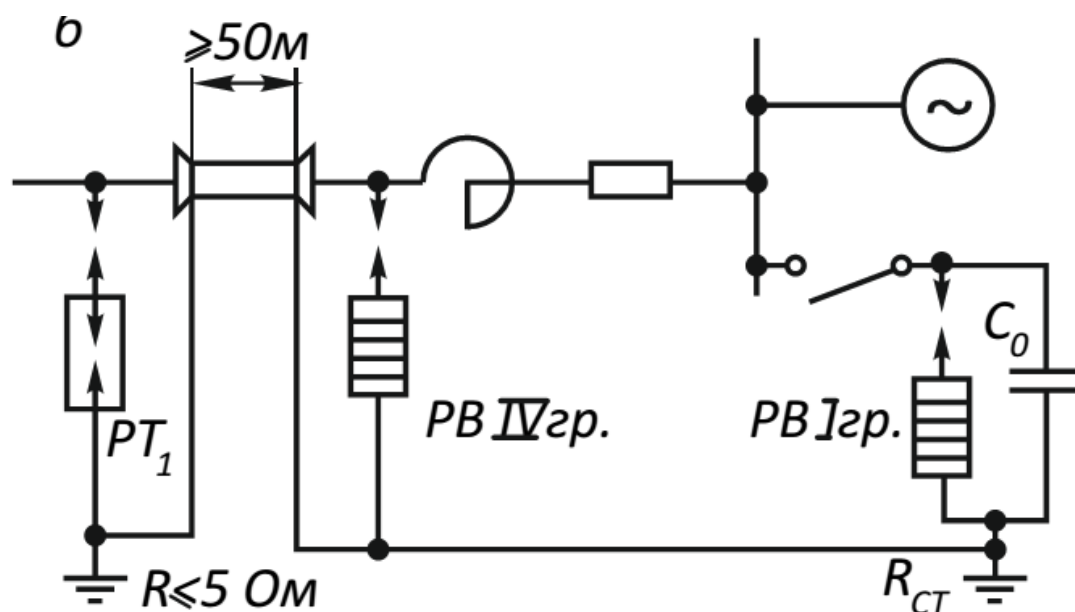
Головна трудність грозозахисту ОМ полягає у тому, що вентильні розрядники, які мають малі опори, не можуть надійно захищатися від великих імпульсних струмів існуючими трубчастими розрядниками. Для цього потрібно виконати опір заземлення РТ дуже малим (менш як 1 Ом). Зазвичай встановлюють три комплекти трубчастих розрядників з опором заземлення кожного 3 Ом. Для підвищення надійності застосовуються кабельні вставки, реактори та інше.

10.3.1 Генератор підключений безпосередньо до ПЛ



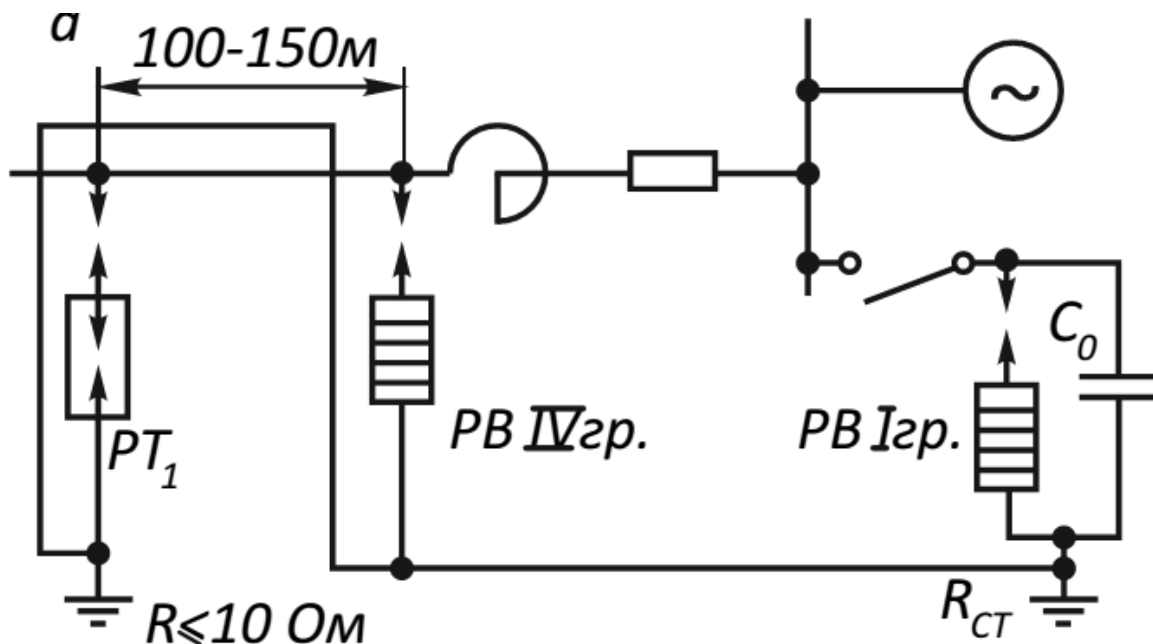
Підхід ВЛ на металевих або залізобетонних опорах захищається від прямих ударів блискавки тросом протягом не менш як 300 м.

10.3.2 Генератор підключений до ПЛ через реактор і кабельну вставку



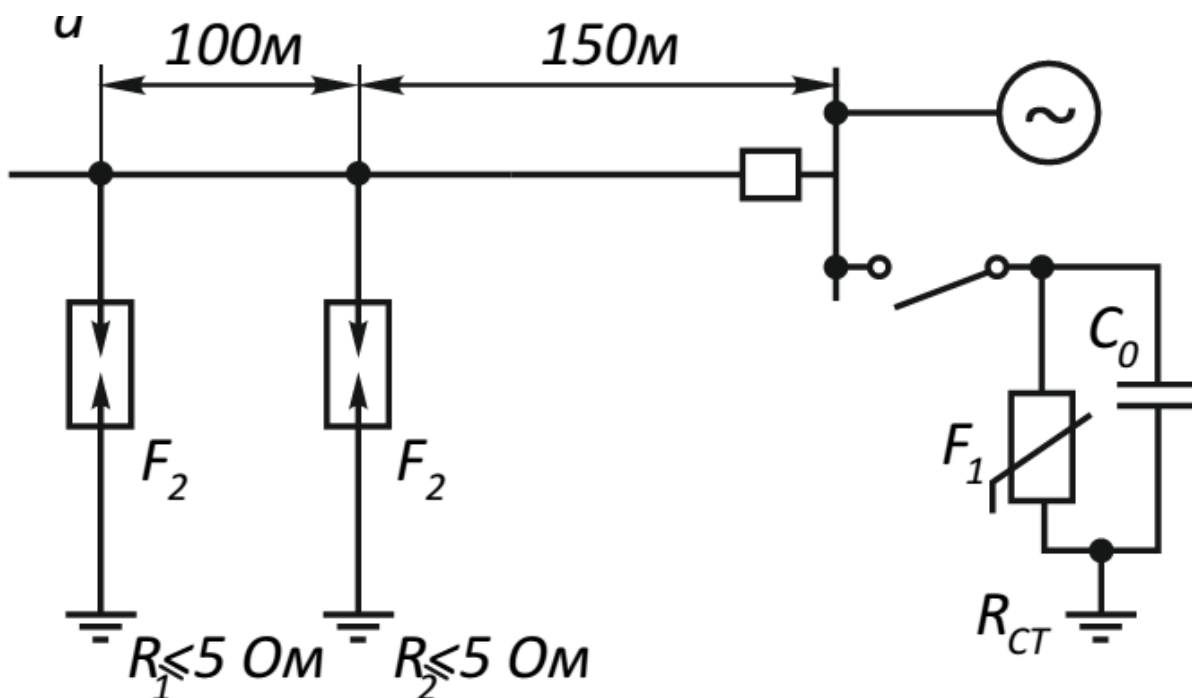
При наявності реактора і кабельної вставки захист підходу від прямих ударів блискавки не потрібен.

10.3.3 Генератор підключений до ПЛ через реактор

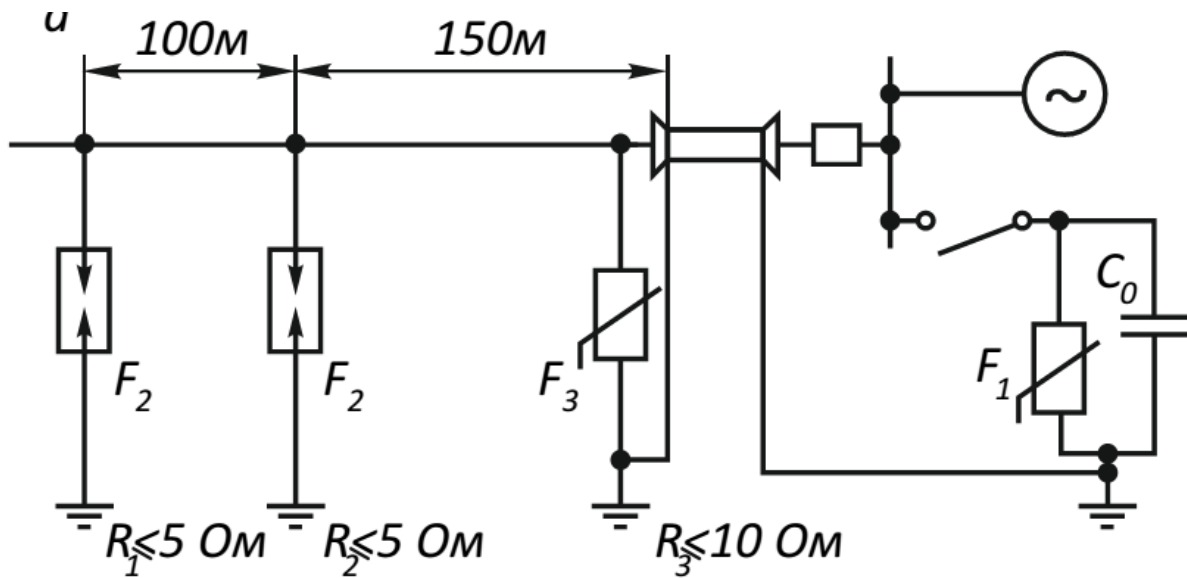


При наявності реактора підхід ПЛ на довжині 100...150 м захищається від прямих ударів блискавки за допомогою блискавковідводів.

10.3.4 Захист електродвигунів потужністю до 3000 кВт



10.3.5 Захист електродвигунів потужністю до 3000 кВт при наявності кабельної вставки



10.4 Захист струмопроводів від ПУБ

Струмопроводи зазвичай входять в зони захисту підстанції. При цьому місце приєднання блискавковідводів до заземлюючого пристрою віддалене від місця приєднання до нього заземлюваних елементів струмопроводу не менш ніж на 20 м.

Якщо відкриті струмопроводи не входять до зони захисту, то вони захищаються блискавковідводами, що стоять окремо, або тросами, підвішеними на окремих опорах із захисним кутом не більше 20°.

Заземлення окремо розташованих блискавковідводів і торосових опор повинно виконуватися відокремленими заземлювачами, які не мають з'єднання з заземлюючими пристроями струмопроводу.

Відстань між струмопроводом та блискавковідводом має бути не менше 5 м по повітрю і не менше 5 м у землі.

10.5 Захист ГЗП 35...220 кВ від набігаючих хвиль по лініях НН

Як правило, лінії 3...10 кВ не обладнаються тросовим захистом на всьому протязі і навіть на підходах до підстанцій.

Підходи до підстанцій захищаються лише трубчастими розрядниками.

На шинах РП встановлюються вентиляльні розрядники відповідної напруги.

При близьких ПУБ в лінію 6...10 кВ перепад напруги між трансформатором і РП може бути небезпечним.

Тому біля введів трансформаторів встановлюються додаткові комплекти вентиляльних розрядників. Вони ж захистять ізоляцію 6...10 кВ від хвиль, що проходять через ємнісний зв'язок в разі від'єднання обмоток трансформатора від лінії 6 кВ.

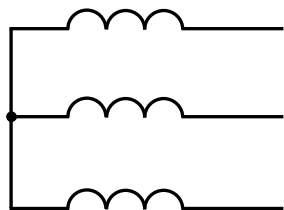
Недолік схеми – струм у вентиляльному розряднику при близьких ударах блискавки може бути дуже великим, оскільки пробіг хвилі малий, а збільшити цю відстань не можна (зростає ймовірність ураження незахищеної ділянки).

11 Режими заземлення нейтралі електричних систем

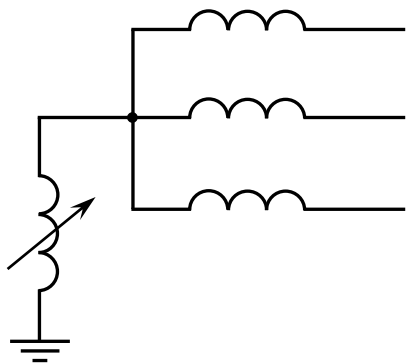
Нейтралі трансформаторів і генераторів трифазної системи електропостачання промислового підприємства можуть бути ізольовані від землі або заземлені безпосередньо або через індуктивні (активні) опори. Це так зване робоче заземлення – гальванічне з'єднання із заземлюючим пристроєм будь-якої точки струмоведучих частин електроустановки. Воно необхідне для забезпечення нормальної роботи електроустановки.

МЕК рекомендована наступна класифікація систем залежно від способу заземлення нейтралі:

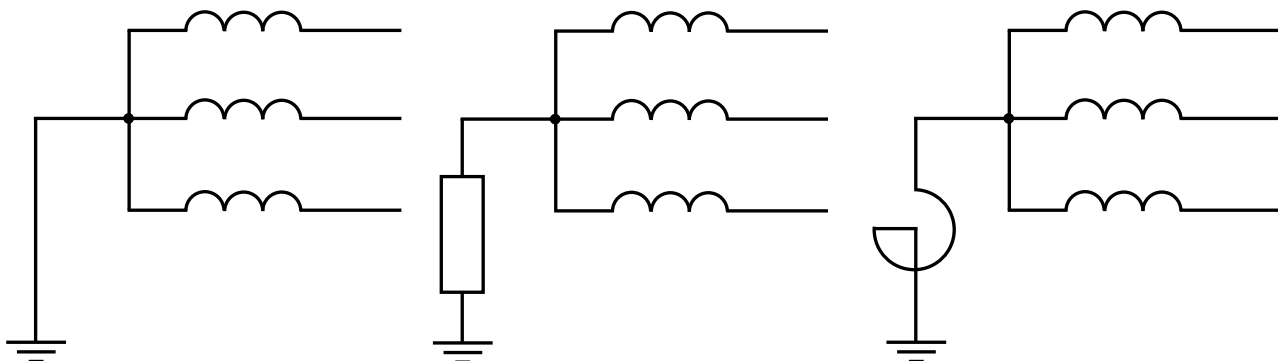
– система з ізольованою нейтраллю, тобто з нейтраллю, яка не з'єднана із землею;



– резонансно заземлена система (заземлена через дугогасний реактор);



– система із заземленою нейтраллю (наглухо, через активний або реактивний опір).



Система із заземленою нейтраллю може бути:

- системою з ефективно заземленою нейтраллю в даній точці;
- системою з неефективно заземленою нейтраллю.

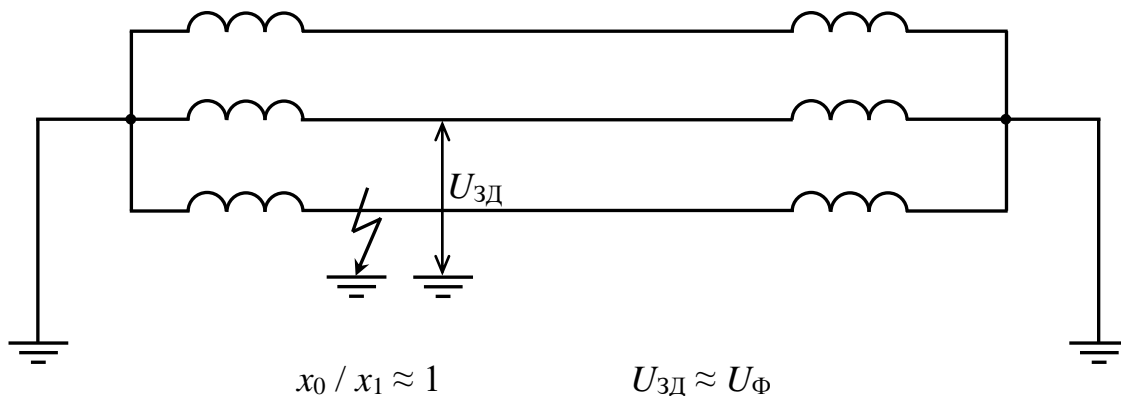
У різних країнах є різновиди цих режимів заземлень, але загальна класифікація залишається відповідно до рекомендацій МЕК.

Вибір схеми робочого заземлення нейтралі виконується з урахуванням безперервності та економічності системи. Головними причинами, що приводять до аварійного режиму роботи системи є однофазні замикання на землю. У зв'язку з цим, вибір способу заземлення нейтралі залежить від поведінки системи при однофазному замиканні на землю. Прийнятий спосіб повинен забезпечити найбільш швидко ліквідацію дуги замикання на землю і відновлення електропостачання споживачів.

Поведінка дуги однофазного замикання на землю, в свою чергу, зумовлюється величиною цього струму.

Цілком очевидно, що при глухому заземленні нейтралі, струм однофазного замикання великий, а підвищення напруги на здорових фазах не відбувається. І, навпаки, при ізольованій нейтралі струм однофазного замикання малий (в межі дорівнює нулю), а напруга на здорових фазах підвищується до лінійної.

11.1 Глухозаземлена нейтраль



x_1 – опір прямої послідовності системи;

x_0 – опір нульової послідовності.

Напруга на здорових фазах у цьому випадку близька до номінальної фазової, тобто перенапруг немає.

Струм замикання на землю (однофазного) великий і дорівнює струму трифазного КЗ, тому система відключається досить часто. Як правило, застосовується однофазне або трифазне АПВ.

Система чинить великий електромагнітний вплив на лінії зв'язку.

Велика ймовірність пошкодження апаратури за рахунок електродинамічних сил.

Низький рівень електробезпеки, велика напруга дотику та крокова напруга, і як наслідок значне збільшення витрат на заземлюючий пристрій.

Релейний захист у таких системах працює надійно, а головне – система вигідна по ізоляції. У чистому виді застосовується рідко в силу зазначених вище недоліків (системи 220 кВ і вище).

Є різновидом режиму ефективно заземленої нейтралі.

11.2 Ефективно заземлена нейтраль

Частково, недоліки режиму глухозаземленої нейтралі можна зняти, зменшивши величину струмів однофазного замикання на землю.

У загальному випадку, цього досягають збільшенням опору нульової послідовності системи.

$$1 < x_0 / x_1 \leq 3 ; \quad r_0 / x_1 \leq 1 ; \quad I_K'' \geq 0,6 \cdot I_K^{(3)} ; \quad U_{зд} \leq 1,4 \cdot U_\Phi ,$$

а з урахуванням 5% підвищення напруги в мережі $U_{зд} \leq 0,8 \cdot U_L$.

Ефективним заземленням називається таке з'єднання нейтралей трансформаторів та генераторів із землею, при якому коефіцієнт замикання не перевищує величину 1,4.

Відповідний цьому режиму розрядник називається 80 %-вим.

Струм однофазного замикання на землю при цьому обмежується до величини, істотно меншої струму трифазного КЗ (не більше 60 %).

Селективність струмового захисту при таких режимах забезпечується.

Підвищення напруги на ізоляції здорових фаз не перевищує 1,4, а кратність внутрішніх перенапруг невелика ($U_{вн} / U_\Phi \leq 2,5$).

Ця система також відноситься до систем з великими струмами замикання на землю (> 500 А). Вона є свого роду компромісною.

Разом зі зниженням струмів КЗ відбувається підвищення кратності внутрішніх напруг.

Збільшення опору нульової послідовності домагаються за рахунок:

1. Заземлення нейтралі через активний опір. Струм в місці пошкодження при цьому буде більше ємнісного. Дуга однофазного замикання горить стійко. Надійність заземлення нейтралі гарна. При правильно обраній величині опору система працює стійко. Однак це рішення неекономічне і знаходить застосування тільки при заземленні нейтралі генераторів.

2. Заземлення нейтралі через індуктивний опір – еквівалентно заземленню через активний опір, але більш економічне заземлення нейтралі тільки частини трансформаторів (одного або двох на підстанції). Таке рішення не вимагає додаткових витрат, проте необхідний постійний контроль коефіцієнта заземлення системи.

Область застосування систем з ефективним заземленням нейтралі – системи 110 кВ і вище, тобто системи з високою вартістю ізоляції.

11.3 Неєфективно заземлена нейтраль

$x_0 / x_1 > 3$ має місце при великих опорах заземлення нейтралей. Струм однофазного замикання на землю менший, ніж у попередніх випадках, однак напруга на здорових фазах значна та може досягати лінійної. Для захисту таких систем необхідне застосування 115 %-вих розрядників. Системи з таким заземленням нейтралі застосовуються рідко.

11.4 Ізольована нейтраль

$x_0 / x_1 < 0$. Опір нульової послідовності та струм однофазного замикання на землю носять ємнісний характер. Замикання на землю однієї фази не є КЗ і практично не впливає на роботу споживачів.

Замикання на землю найчастіше дугове, струм невеликий і дуга самоліквідується при першому ж проходженні струму через нуль.

Звичайний релейний захист не може реагувати на такі малі струми. У потужних системах струм виявляється достатнім для стійкого горіння дуги. Дуга однофазного замикання на землю в таких випадках під впливом вітру та теплових переміщень переходить на інші фази. Замикання переходить у трифазне, після чого відключається.

Напруга на здорових фазах при однофазних замиканнях на землю практично завжди більше лінійної (теоретично при $x_0 / x_1 = -2$, тобто при резонансі та відсутності активних опорів зростає до нескінченності).

Застосовується 115 %-вий розрядник.

Ізольована нейтраль забезпечує більшу безперебійність електропостачання, дозволяє мати менше число захисної та вимірювальної апаратури (2-х фазне виконання), тому застосовується в мережах 35 кВ і нижче, якщо струм замикання на землю малий.

Багаторічний досвід експлуатації дозволив встановити критичні значення ємнісних струмів, які залежно від номінальної напруги системи складають:

- 30 А при 3...6 кВ
- 20 А при 10 кВ
- 15 А при 20 кВ
- 10 А при 35 кВ
- 5 А при 6...10 кВ (блок генератор – трансформатор).

Якщо струм замикання на землю перевищує ці значення, застосовують його компенсацію за допомогою дугогасних котушок або реакторів.

11.5 Резонансно заземлена нейтраль

Зменшення ємнісного струму замикання на землю практично до нуля можна домогтися заземленням нейтралі генераторів і трансформаторів через

дугогасні реактори, реактивний опір яких приблизно дорівнює ємнісному опору системи.

При цьому $x_0 = \infty$; $U_{зд} = U_L$, тобто з точки зору підвищення напруги на здорових фазах цей режим еквівалентний ізольованій нейтралі.

Найбільше поширення набули дугогасні реактори, що складаються з осердя та обмотки, розташованої в кожусі, заповненому трансформаторним маслом. Індуктивність реактора L регулюють зміною числа витків або зазору осердя. Активний опір реактора невеликий у порівнянні з індуктивним.

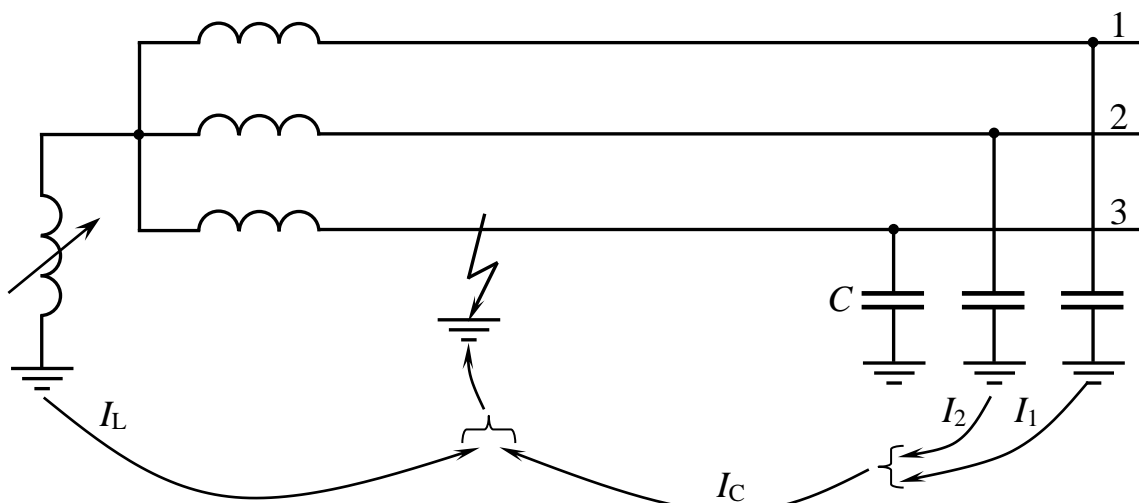
При компенсації ємнісного струму в місці замикання індуктивним, система може тривалий час працювати із замкнутою на землю фазою. При цьому напруга в усіх точках мережі має ті ж значення, що й в системі з ізольованою нейтраллю.

Показником ефективності компенсації є відношення кількості замикань на землю, які не розвинулися у КЗ, до загальної кількості замикань.

У компенсованих системах цей показник становить 0,6...0,9 (для порівняння в системах з ізольованою нейтраллю – 0,3). У системах з компенсацією ємнісного струму на землю не потрібен релейний захист від замикання на землю, що діє на відключення ліній, трансформаторів і генераторів, а також електродвигунів, підключених безпосередньо до мережі. Тут досить установки вибіркової сигналізації. Виняток становлять системи напругою 3...35 кВ з підвищеною небезпекою обслуговування устаткування, в якій замикання на землю повинні вибірково відключатися. До них відносяться системи електропостачання шахт і відкритих гірничих робіт.

Компенсація ємнісних струмів забезпечує, крім того, вигідні для експлуатації якості:

- полегшуються вимоги до заземлюючих пристроїв (через зменшення струму однофазного замикання);
- при збереженні стійкої дуги зменшується ймовірність переходу в багатозаземлені КЗ;
- зменшується ймовірність повторного запалювання дуги і виникнення комутаційних перенапруг.



Розглянемо поведінку системи з резонансним заземленням нейтралі при однофазному замиканні на землю.

Ємнісний струм з фази 2

$$I_2 = U_2 \cdot \omega \cdot C = \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C$$

Ємнісний струм фази 2 і фази 1

$$I_C = \sqrt{3} \cdot I_2 = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C$$

Умова компенсації

$$I_L = I_C \quad U_N / (\omega \cdot L) = U_{\Phi} / (\omega \cdot L) = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot \omega \cdot C \quad \omega \cdot L = 1 / (3 \cdot \omega \cdot C)$$

При ідеальному налаштуванні частота власних коливань мережі з індуктивною котушкою (частота ω_0) дорівнює частоті джерела (ω_1), тобто в мережі має місце резонанс струмів основної частоти. З цієї причини режим заземлення має кілька назв:

- компенсація ємнісного струму;
- заземлення через котушку Петерсена;
- заземлення через налаштовану індуктивність;
- резонансне заземлення.

Дугогасні котушки з метою зменшення габаритів виконуються на сталевих осердях. Для зменшення нелінійності вольт-амперної характеристики осердя виконується з повітряним зазором. Всього виконується 5...9 відгалужень, які дозволяють змінювати струм компенсації у відношенні 1:2 або 1:2,5.

Номінальна потужність котушки (реактивна) визначається за верхньою межею струму компенсації.

$$Q_P = 1,25 \cdot U_{\Phi} \cdot I_C ,$$

де 1,25 – запас на перекомпенсацію.

Справа в тому, що перенапруги мають мінімальну величину при ідеальному налаштуванні, припустиму – при розладі $\pm 5\%$. Розлад понад 5% призводить до появи в системі перенапруг, більших, ніж при ізольованій нейтралі. У цьому плані більш вигідний розлад убік перекомпенсації, ніж недокомпенсації.

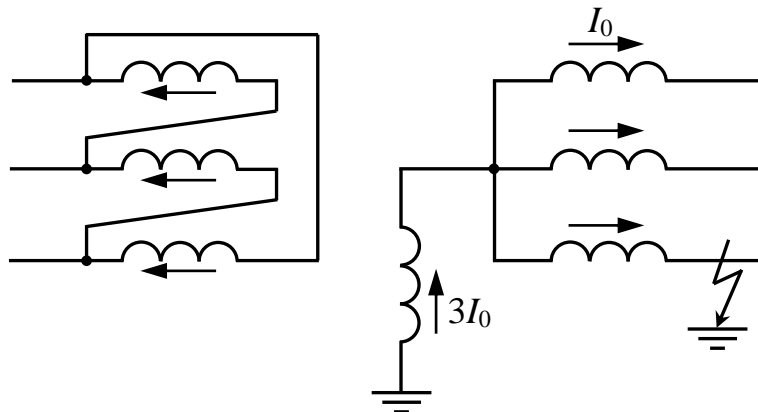
Ємнісної струм системи визначається за спрощеними залежностями

$$I_C = (2,7 \dots 3,3) \cdot U_N \cdot l \cdot 10^{-3} ,$$

де l – сумарна довжина повітряних ліній у км; $(2,7 \dots 3,3)$ мА/(км·кВ) – питомий ємнісний струм замикання на землю для ліній без тросів та з тросами відповідно.

11.6 Включення дугогасних котушок

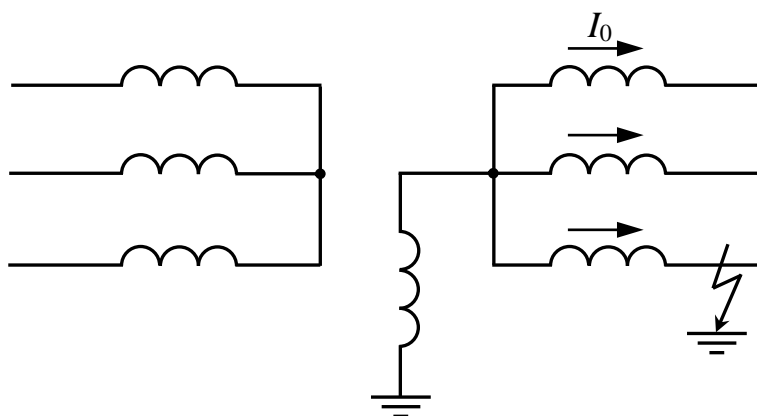
Найчастіше котушки включаються в нейтраль трансформаторів, які працюють. Для найкращого використання потужності котушки трансформатор, в нейтраль якого вона включається, повинен мати мінімальний опір нульової послідовності.



“трикутник/зірка”

Струм нульової послідовності має можливість протікати (замикатися в первинній обмотці). Магнітні потоки нульової послідовності вторинної обмотки компенсовані, врівноважені магнітними потоками первинної обмотки. Сумарний магнітний потік на трансформаторі близький до нуля (потік розсіювання). Схема не дає додаткових втрат і нагрівання.

Потужність котушки може досягати 50 % потужності трансформатора (на час до 2 годин).



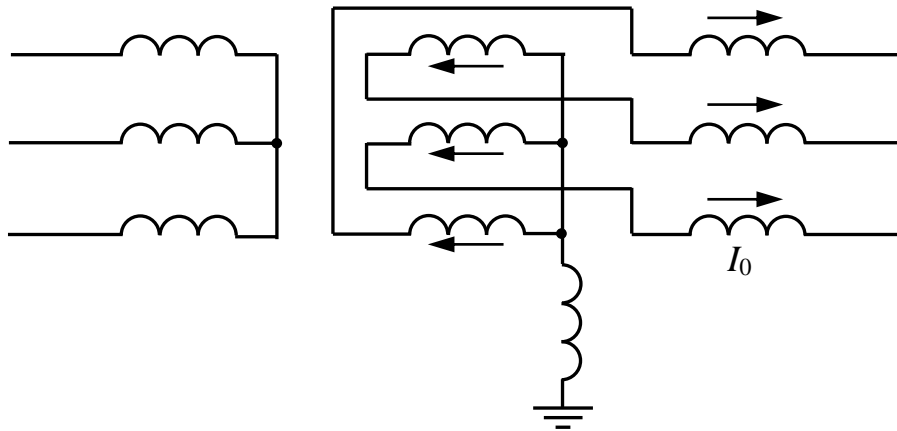
“зірка/зірка”

Магнітні потоки нульової послідовності створюються струмами вторинної обмотки (при замиканнях на землю).

У первинній обмотці струми нульової послідовності протікати не можуть, отже магнітний потік в осерді трансформатора великий (не скомпенсований), він замикається по повітрю, маслу та стінкам бака, нагріваючи його. Обмотки трансформатора мають при цьому підвищений індуктивний опір, сумірний з опором котушки. Погіршується можливість регулювання струму компенсації. Особливо несприятливий випадок, коли трансформатор “зірка/зірка” має замкнуту магнітну систему, оскільки при цьому магнітні потоки нульової послідовності замикаються без зазорів,

індуктивний опір нульової послідовності дуже великий і включення котушки не має сенсу.

Потужність котушки, включеної за такою схемою не повинна перевищувати 25 % потужності трансформатора.



“зірка/зигзаг”

На кожному осерді розташовані 2 котушки, струми нульової послідовності, що протікають по них, створюють зустрічно-спрямовані магнітні потоки (тобто відбувається компенсація). Схема сприятлива для включення дугогасної котушки. Допускається потужність 50 %.

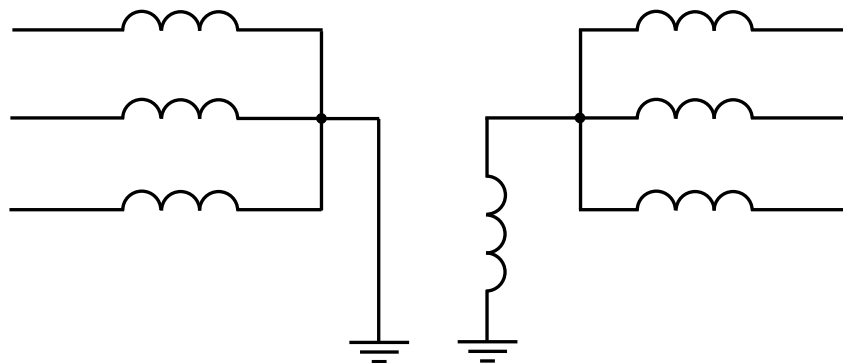


Схема аналогічна розглянутим вище, допускає включення котушки потужністю 50 % потужності трансформатора. Застосовується рідко.

Котушки можуть включатися також в нейтраль непрацюючого трансформатора, який спеціально встановлений для цієї мети.

При виборі числа дугогасних котушок та місця їх установки слід враховувати можливість тимчасового поділу мережі на окремі, електрично не пов'язані частини. При такому поділі кожна частина повинна мати необхідну компенсуючу потужність.

Приклад позначення дугогасних котушок:

ЗРОМ–350/6

З – захисний; Р – реактор; О – однофазний; М – масляний; 350 – потужність у квар (відповідає струмам компенсації 50...100 А); 6 – номінальна напруга мережі, кВ.

Системи з резонансно заземленою нейтраллю, застосовуються при напрузі 6...35 кВ, рідше 110 кВ, іноді навіть 150 кВ при великих струмах однофазного замикання на землю.

12 Внутрішні перенапруги

Сучасні засоби грозозахисту забезпечують таке зниження рівня атмосферних перенапруг, при якому вирішальну роль для ізоляції мають рівні внутрішніх перенапруг.

Внутрішніми називаються перенапруги, що виникають за рахунок внутрішньої енергії системи при зміні параметрів і режимів роботи електроустановки.

Внутрішні перенапруги поділяються на комутаційні та резонансні.

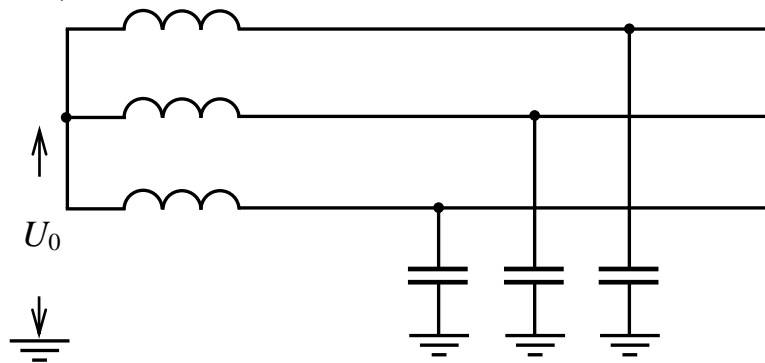
12.1 Перенапруги при КЗ в системах з ізольованою нейтраллю

У нормальному режимі роботи мережі зміщення нейтралі завжди відмінно від нуля, оскільки ємності проводів відносно землі неоднакові.

Наприклад, при горизонтальному розташуванні проводів $C_2 = 0,9 \cdot C_1 = 0,9 \cdot C_3$. ЕРС нульової послідовності при цьому $U_0 \approx 0,035 \cdot U_\phi$ і зростає при аварійних режимах.

Якщо в нейтраль системи включена дугогасна котушка, то зміщення збільшиться внаслідок явища резонансу.

Для несиметричної 3-х фазної мережі з ізольованою нейтраллю її зміщення U_0 визначається провідностями фаз відносно землі (в основному ці провідності ємнісні).



$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_1 + \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_2 + \dot{U}_3 \cdot \dot{Y}_3}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3}$$

В системі з резонансним заземленням причиною зміщення нейтралі як і раніше залишається несиметрія провідностей або опорів фаз, але величина цього зміщення також залежить і від опору нейтралі (дугогасної котушки).

$$\dot{U}_N = \dot{U}_0 \cdot \frac{Z_0}{Z_0 + \frac{1}{3} \cdot Z} = \dot{U}_0 \cdot \frac{\frac{1}{\dot{Y}_0}}{\frac{1}{\dot{Y}_0} + \frac{1}{3 \cdot \dot{Y}}} = \dot{U}_0 \cdot \frac{\frac{1}{\dot{Y}_0}}{\frac{3 \cdot \dot{Y} + \dot{Y}_0}{\dot{Y}_0 \cdot 3 \cdot \dot{Y}}}$$

$$\dot{U}_N = \frac{3 \cdot \dot{Y}}{3 \cdot \dot{Y} + \dot{Y}_0} \cdot \dot{U}_0 \quad \text{або}$$

$$\dot{U}_N = U_0 \cdot \frac{j3\omega C + g}{j3\omega C + g + \frac{r}{(\omega L)^2 + r^2} - j \frac{\omega L}{(\omega L)^2 + r^2}} = \frac{U_0 j3\omega C}{j \left(3\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) + \frac{r}{(\omega L)^2} + g} = \frac{U_0}{1 - \frac{1}{\omega^2 LC} - j \frac{\frac{r}{\omega L^2} + g}{3\omega C}}$$

Зміщення нейтралі визначається ступенем налаштування

$$k = \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \quad k = \left(\frac{1}{\sqrt{3CL}} \right)^2 / \omega^2 = \frac{1}{\omega^2 3CL}$$

$$U_N = \frac{U_0}{1 - k - j\delta} ,$$

де $\delta = \frac{r/(\omega L)^2 + g}{3\omega C}$ – відносне значення активної провідності.

При ідеальному налаштуванні ($k = 1$) зміщення нейтралі визначається тільки активними втратами і буде завелике.

$$U_N = U_0 / \delta ,$$

$$\text{при } \delta = 0,1 \quad U_N = 10U_0 ; \quad \text{при } k = 0,8 \quad U_N = 4,5U_0,$$

тобто втрати активні і розлад відіграє позитивну роль в обмеженні зміщення нейтралі.

Зміщення нейтралі системи неприпустимо через перешкоди на лінії зв'язку, крім того, це несприятливо позначається на рівні внутрішніх перенапруг.

Тому в системах з резонансним заземленням нейтралі необхідно звертати особливо серйозну увагу на симетрію ємностей відносно землі та в разі необхідності застосовувати транспозицію проводів.

При горизонтальному розташуванні проводів через несиметрію ємностей зміщення складає невелику величину

$$U_0 = 0,035U_\Phi$$

В системі з ізольованою нейтраллю цей рівень зростає на порядок

$$U_N \approx 0,35U_\Phi \quad (\text{при } \delta = 0,1 \text{ и } k = 1)$$

Застосування транспозиції знижує несиметрію і тоді навіть при малих втратах ($\delta = 0,05$) зміщення нейтралі не перевищить $0,2U_\Phi$.

Значно більші зміщення можуть виникати при обриві або відключенні однієї фази на ділянці лінії. При цьому якщо нейтраль була недокомпенсована

($k < 1$), то в результаті відключення системи наблизиться до резонансу, а перенапруги через зміщення нейтралі зростуть. Більш вигідна перекомпенсація, оскільки після обриву або відключення розлад збільшиться.

Необхідно відзначити і той факт, що надмірне зростання перенапруг при точному налаштуванні системи в резонанс обмежується нелінійністю котушки. Нейтраль трансформатора з дугогасною котушкою в обов'язковому порядку захищається вентиляним розрядником.

Підлягають захисту вентиляними розрядниками виведені нейтралі трансформаторів (як при включенні дугогасних котушок, так і при виведеній нейтралі).

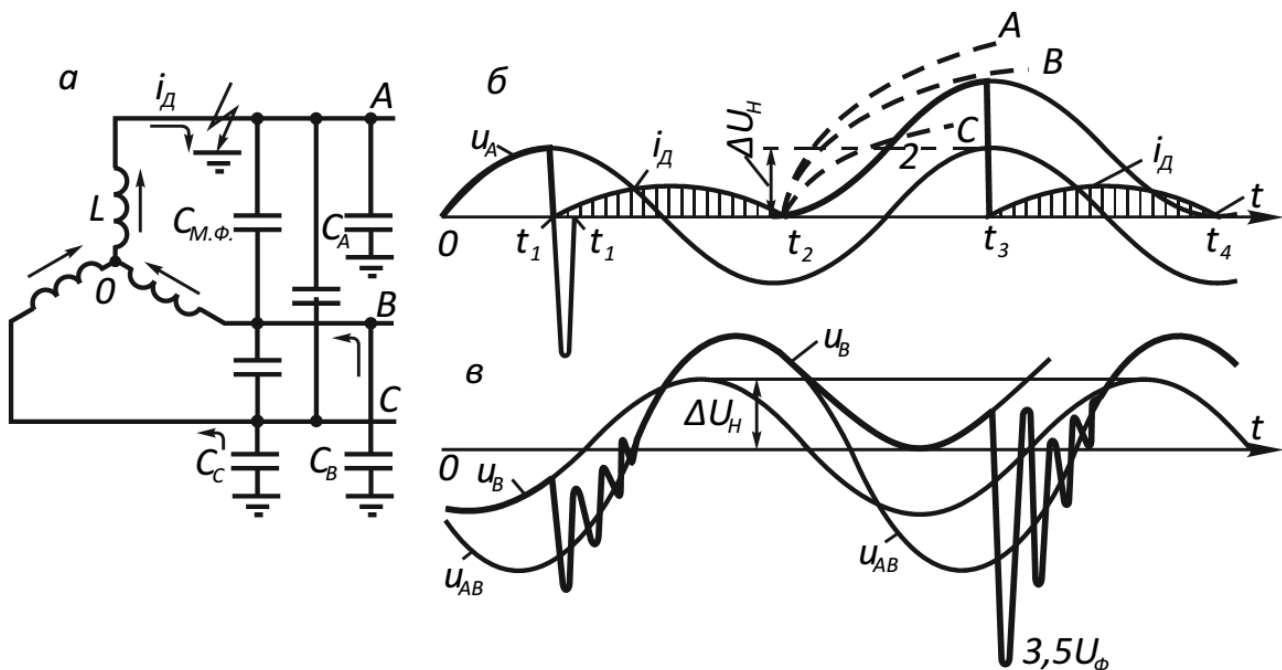
Захист ізоляції нейтралі здійснюється розрядником на напругу, що відповідає класу ізоляції нейтралі.

Для трансформаторів з напругою 35 кВ – РВС-20, 110 кВ – 2РВС-20, 220 кВ – РВС-110.

Окрім того, всі вільні обмотки трансформаторів захищаються розрядниками.

12.2 Перенапруги при дугових замиканнях на землю

При неметалічному замиканні на землю дуга періодично гасне та запалюється знов, тобто має перемежований характер. В цьому випадку в мережі можуть виникнути перенапруги, що досягають значних величин. небезпека таких перенапруг посилюється тим, що вони можуть існувати тривалий час (за нормами допускається до двох годин) і впливають на ізоляцію всіх електрично пов'язаних елементів мережі. Крім того, дуга може перекинутися на сусідні фази і викликати міжфазне замикання.



Механізм виникнення дугових перенапруг в трифазній системі показаний на рисунку *a*. Вторинна обмотка трансформатора живить лінію, що

має симетричні ємності відносно землі $C_A = C_B = C_C = C$. Для спрощення розгляду процесу вважаємо, що ємності між фазами $C_{М.Ф}$ невеликі та їх впливом можна знехтувати. Також вважаємо, що опір ізоляції мережі дорівнює нескінченності, і що повторні запалювання дуги в мережі відбуваються в моменти максимуму напруги на пошкодженій фазі, а гасіння - при переході через нуль струму промислової частоти ω .

Зміни потенціалів фаз A і B , а також лінійної напруги $u_{AB} = u_B - u_A$ представлені на рисунках *б* та *в*. Нехай в деякий момент часу t_1 відбувається замикання фази A на землю і в точці замикання виникає дуга. Потенціал «хворої» фази A при цьому падає практично миттєво до нуля, а потенціал «здорової» фази B підвищується до лінійного.

Ця зміна потенціалу здорової фази супроводжується вільними коливаннями, викликаними перезарядом її ємності через індуктивність трансформатора. Частота вільних коливань $\omega_1 = 1/\sqrt{3L(C + C_{М.Ф})} > \omega$, а амплітуда $U_B(t_1) = U_{Поч}(t_1) - U_{УСТ}(t_1)$. Накладаючись на усталене значення напруги здорової фази, вільні коливання визначають її найбільший потенціал, який настає через півперіоду вільних коливань. Наприклад, для фази B без урахування загасання амплітуди вільних коливань:

$$U_{CB}(t_1) = 0,5 \cdot U_{\Phi} - (1,5 \cdot U_{\Phi}) = U_{\Phi} \quad \text{та} \quad U_{\max}(t_1) = 1,5 \cdot U_{\Phi} + U_{\Phi} = 2,5 \cdot U_{\Phi}.$$

Вільні коливання швидко затухають внаслідок значного опору контуру $L(C + C_{М.Ф})$, і в подальшому напруга на здоровій фазі B змінюється за кривою u_{AB} , а на пошкодженій фазі при горінні дуги напруга залишається рівною нулю. Дуга гасне в точці t_2 , коли струм дуги i_d , що є ємнісним струмом фаз B та C , проходить через нуль. При цьому в мережі залишається заряд на двох здорових фазах $Q_2 = 2C \cdot 1,5 \cdot U_{\Phi}$ (напруга фази C , яка відстає від напруги u_{AB} на 60° , також дорівнює $1,5 \cdot U_{\Phi}$). Після згасання дуги цей заряд розподіляється порівну між усіма фазами (оскільки як $C_1 = C_2 = C_3$) і вони набувають потенціал $+U_{\Phi}$. Таким чином, потенціал нейтралі системи зміщується на величину $\Delta U_N = +U_{\Phi}$, і зміна потенціалів всіх фаз в подальшому відбувається відносно цього значення потенціалу нейтралі (ділянка $t_2 - t_3$).

У точці t_3 (максимум напруги фази A) відбувається нове запалювання дуги, потенціал пошкодженої фази падає до нуля, а здорової фази B змінюється від $0,5 \cdot U_{\Phi}$ до $-1,5 \cdot U_{\Phi}$, тобто $U_{CB}(t_3) = 2 \cdot U_{\Phi}$. Максимальний потенціал фази B досягає при цьому $3,5 \cdot U_{\Phi}$.

Надалі (точки t_4 і наступні) процес повторюється при таких же умовах, що і для точок t_2 та t_3 . Таким чином, кожне нове повторне запалювання буде супроводжуватися підвищенням потенціалу здорової фази до $3,5 \cdot U_{\Phi}$. Процес підвищення напруги на фазі C протікає аналогічно.

Розглянута теорія виникнення дугових перенапруг, що припускає згасання дуги в момент проходження через нуль струму основної частоти, була запропонована американським інженером Слепяном. Аналогічна теорія, але яка припускає, що дуга гасне в момент проходження через нуль вільного струму i_{CB}

(точка t_1'), була запропонована Петерсеном. За цією теорією, напруга на справних фазах в трифазній системі може підвищуватися до $7,5 \cdot U_{\phi}$.

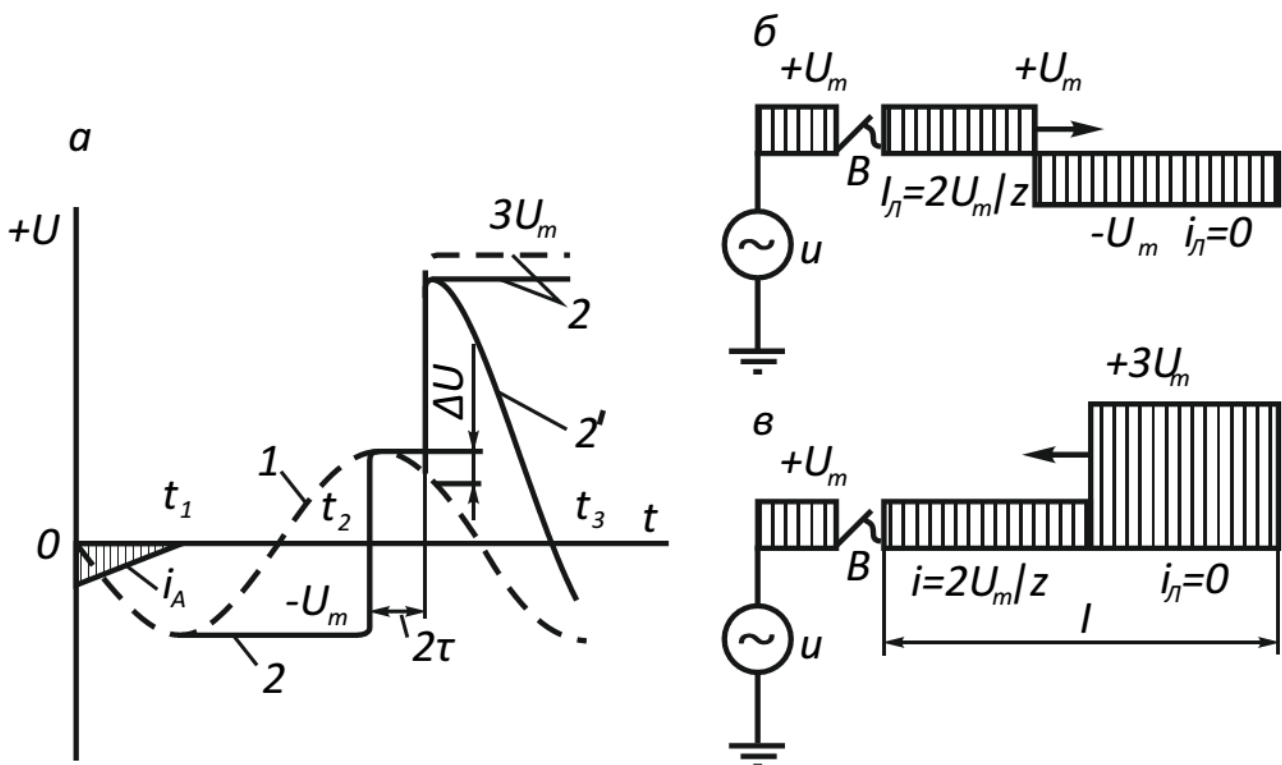
Спостережувані в електричних мережах дугові перенапруги завжди значно нижчі за ті, котрі слідують із зазначених теорій. Це пояснюється тим, що в реальних умовах мережі завжди володіють деяким кінцевим опором ізоляції, між проводами існує ємність, повторні запалювання дуги можуть відбуватися не при максимумі напруги (точка 1), а раніше (точка 2 на кривій u_A), та амплітуди вільних коливань зазнають значного затухання. Все це зменшує заряд Q , який залишається після гасіння дуги, і, відтак, амплітуди перенапруг.

Дослідження, проведені Ч. М. Джуварли та Н. Н. Беляковим, дозволили створити теорію, не прив'язану до того чи іншого механізму гасіння дуги. За цією теорією, можливість повторного запалювання визначається співвідношенням між напругою на дузі u_A та міцністю проміжку, які відновлюються (криві 1, B і C на малюнку б). Імовірність гасіння та повторного запалювання дуги залежить при цьому від багатьох факторів, теоретичний облік яких скрутний, а часом неможливий.

Численні дослідження в енергосистемах показали, що перенапруги $(3 \dots 3,2) \cdot U_{\phi}$ є граничними при дугових замиканнях на землю. Короткочасні перенапруги $3 \cdot U_{\phi}$ не становлять небезпеки для нормальної ізоляції при робочих напругах, що не перевищують 35 кВ. Однак тривалі перенапруги такого порядку, а вони існують протягом усього часу дугового замикання на землю, можуть викликати пошкодження послабленої та забрудненої ізоляції.

12.3 Перенапруги при відключенні ліній

Перенапруги при відключенні ненавантажених ліній виникають внаслідок повторних запалень дуги між контактами вимикача.



Розглянемо цей процес на прикладі лінії, що відключається вимикачем B , опір ізоляції лінії вважаємо рівним нескінченності.

Дуга між контактами вимикача згасне в момент t_1 (рисунок *a*) проходження ємнісного струму лінії через нуль, при цьому на лінії залишиться заряд, який визначається потенціалом проводу $-U_m$ в момент гасіння дуги. Якщо $R_{из} = \infty$, то цей потенціал (крива 2) збережеться до моменту $t_2 = t_1 + T/2$ (T – період джерела живлення). У момент t_2 амплітуда напруги джерела живлення стане рівною $+U_m$, тобто між контактами вимикача буде різниця потенціалів $2 \cdot U_m$, під дією якої у вимикачі, якщо міцність проміжку, що відновлюється, за цей напівперіод виявиться нижче $2 \cdot U_m$, може статися пробій проміжку і повторне запалювання дуги.

В результаті повторного запалювання лінія буде заряджатися від потенціалу $-U_m$ до $+U_m$, тобто по лінії буде поширюватися хвиля напруги $+2 \cdot U_m$ та проходити струм $+2 \cdot U_m / Z$. Розподіл напруги по лінії при цьому процесі в момент до приходу хвилі $+2 \cdot U_m$ до кінця лінії ($t < t_2 + \tau$) і після її відбивання ($t > t_2 + \tau$) з подвоєнням амплітуди, в результаті чого на лінії встановлюється напруга $+4 \cdot U_m - U_m = +3 \cdot U_m$, показано на рисунках *б* і *в* відповідно. Оскільки струм i_L відбивається від розімкненого кінця лінії з протилежним знаком, то в лінії встановлюється струм, рівний нулю. Після приходу через час $2 \cdot \tau = 2 \cdot l / v$ відбитих хвиль до початку лінії на ній встановлюється напруга $+3 \cdot U_m$ і відбувається друге гасіння дуги (рисунок *a*, момент $t_2 + 2 \cdot \tau$).

Таким чином, можна прийти до висновку, що в результаті подальших повторних запалень дуги напруга на лінії буде підвищуватися до $5 \cdot U_m$, $7 \cdot U_m$ і т. д. Насправді цього не відбувається з низки причин.

По-перше, до моменту приходу хвилі відбиття від кінця лінії напруга джерела не залишається рівною U_m , а зменшується до величини $U_m - \Delta U = U_m \cdot \cos(\omega \cdot 2 \cdot \tau)$. При довжині лінії 300 км $2 \cdot \tau$ складає 0,002 с, і напруга джерела зменшується за цей час до $0,81 \cdot U_m$, тому перший максимум напруги буде не $3 \cdot U_m$, а $2,81 \cdot U_m$.

По-друге, при наявності шунтуючих реакторів відбувається розряд лінії на реактор і виникають затухаючі коливання з частотою, зазвичай меншою частоти джерела (крива 2' на малюнку *a*).

В результаті напруга на вимикачі, що відновлюється, буде значно менше $3 \cdot U_m$ (різниця між кривими 1 та 2') і ймовірність повторного запалювання (навіть в масляних вимикачах) буде дуже мала.

Досвід експлуатації показав, що відключення ненавантажених ліній надвисокої напруги не супроводжується повторними запалюваннями при застосуванні повітряних вимикачів навіть при відсутності реакторів або масляних вимикачів при включених шунтуючих реакторах. Тому відключення ненавантажених ліній 500 кВ і вище не являє небезпеки і зазвичай не враховується при проектуванні захисту від внутрішніх перенапруг. Для попередження виникнення таких перенапруг треба застосовувати надійні пристрої автоматичного управління вимикачами.

Аналогічні перенапруги, пов'язані із залишковими зарядами на ємності та процесами її перезарядки при повторних запалюваннях дуги у вимикачах, мають місце також при відключенні та неправильному (уповільненому) включенні батареї конденсаторів.

Сучасні конденсаторні батареї зазвичай комплектуються послідовно-паралельним з'єднанням окремих секцій, кожна з яких захищається запобіжником. Тому в батареях практично не буває повних коротких замикань, що дозволяє застосовувати вимикачі полегшеного типу з дуже великою швидкістю відновлення електричної міцності та виключає можливість повторних замикань.

12.4 Обмеження перенапруг

Хоча перенапруги, що виникають при відключенні ненавантажених ліній, не становлять безпосередньої небезпеки для нормальної ізоляції, їх частий вплив є небажаним.

Крім того, в експлуатації знаходяться електроустановки зі зниженим (до $2,5 \cdot U_{\phi}$) рівнем ізоляції. Для таких установок перенапруги при відключенні холостих ліній стають найбільш важливими.

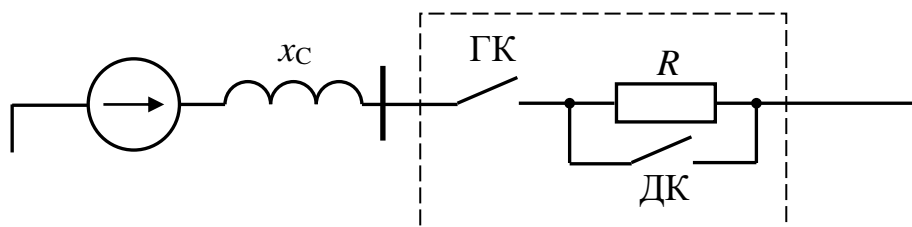
Обмеження перенапруг можливо одним із таких заходів:

1. Підвищення швидкодії комутаційних апаратів (підвищення швидкості відновлення електричної міцності вимикачів).

Теоретично є ефективним способом, тому що або взагалі запобігає появі повторних запалень дуги, або вони відбуваються в момент, коли міцність проміжку ще невелика і перенапруги не є небезпечними.

На практиці цей спосіб не може бути використаний, оскільки призводить до зростання перенапруг при роботі цих вимикачів в інших режимах (наприклад, при відключенні індуктивностей ненавантажених трансформаторів).

2. Застосування шунтуючих опорів в комутаційних апаратах.



Такий вимикач має дві системи контактів: ГК – головні та ДК – допоміжні. Першими розмикаються допоміжні контакти, дуга загоряється і потім гасне (при проходженні синусоїди струму через нуль).

Лінія залишається з'єднаною з джерелом через опір R , тому при зміні напруги джерела заряд з лінії частково стікає назад в джерело. Струм в колі після дуги набуває активну складову. Він проходить через нуль вже не при

максимумі напруги і вона на лінії при гасінні дуги в другому розриві (ГК) виявляється істотно нижче U_{ϕ} .

Ця обставина зменшує ймовірність повторного запалювання дуги і знижує перенапруги, якщо дуга все-таки займеться.

Такі вимикачі знижують перенапруги з $3,5 \cdot U_{\phi}$ до $2,5 \cdot U_{\phi}$, що вже безпечно навіть для ізоляції зі зниженим рівнем електричної міцності.

На жаль, такі конструкції ще не знайшли досить широкого застосування в силу їх складності.

3. Застосування вентильних розрядників.

Розрядник зменшує перенапруження на шинах, але мало впливає на їх рівень в лінії.

Встановлений на лінії розрядник запобігає відбиття хвиль і обмежує перенапруги, як на самій лінії, так і на шинах підстанції. Найбільший ефект має установка розрядника в кінці лінії.

Амплітуда струму через розрядник $I_p = k \cdot U / Z$.

Тривалість проходження струму визначається часом розряду ємності лінії (постійна $R_p \cdot C_L$), де $C_L = 8 \dots 12$ мкФ/км – ємність однієї фази лінії.

Незважаючи на малу амплітуду струму в розряднику, енергія, що виділяється в робочих опорах, може виявитися неприпустимо великою, і розрядник буде пошкоджений. Тому звичайні грозозахисні розрядники можуть застосовуватися максимум до 200 км.

У лініях більшої довжини можна застосовувати тільки спеціальні розрядники з підвищеною пропускнуною спроможністю.

Аналогічні комутаційні перенапруги виникають при спрацьовуванні системи АПВ.

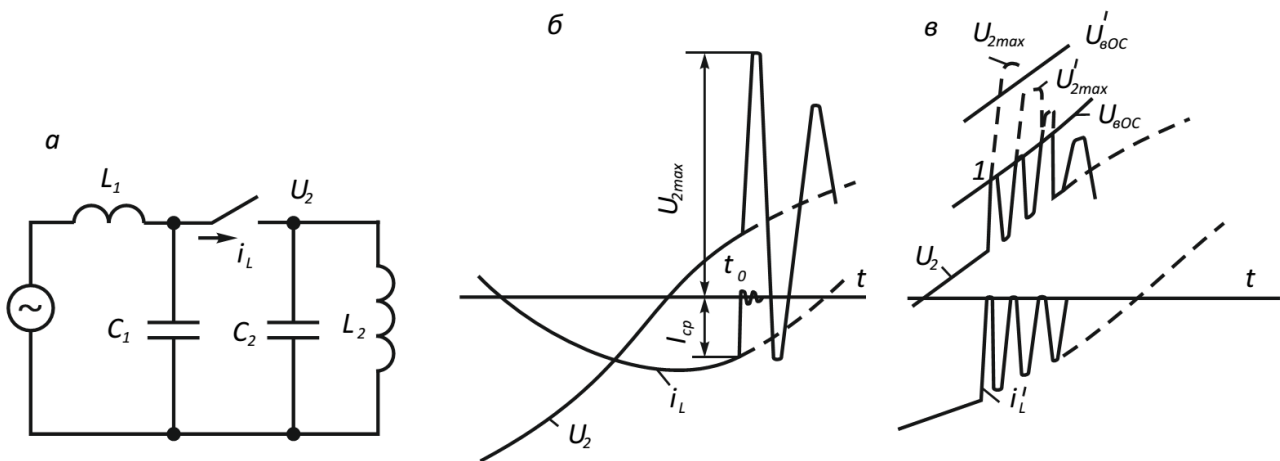
Заходи їх зниження, в основному, такі ж, як і в разі відключення ліній, плюс застосування реакторів поперечної компенсації, що підключаються наглухо або через іскровий проміжок.

Як перспективний напрям слід вважати застосування комутаційних апаратів з керованим моментом включення.

12.5 Перенапруги при відключенні індуктивностей

Перенапруги при відключенні індуктивностей в дуже сильному ступені залежать від процесу обривання струму у вимикачі. При великих токах (відключення коротких замикань або значних індуктивних навантажень) обрив струму буває в момент його природного проходження через нуль, зниження струму до нуля при цьому відбувається плавно, і магнітна енергія у індуктивності, що відключається, практично відсутня.

При малих струмах, наприклад при відключенні ненавантажених трансформаторів, внаслідок слабого ступеня іонізації дуги обрив (“зріз”) струму може відбутися до того, як він пройде своє нормальне нульове значення (в сучасних вимикачах струми зрізу $I_{зр}$ можуть досягати порядку 10 А).



Розглянемо процес відключення індуктивності L_2 (рисунок а). Нехай зріз струму стався в момент t_0 (малюнок б), при цьому в L_2 була запасена магнітна енергія $I_{зр}^2 \cdot L_2 / 2$; індуктивність джерела $L_1 \ll L_2$, і енергія $I_{зр}^2 \cdot L_1 / 2$ внаслідок своєї малої величини на протікання процесу впливу не робить. Після обриву струму в контурі $L_2 \cdot C_2$ виникають коливання з частотою $\omega_2 = 1/\sqrt{L_2 \cdot C_2}$, максимальну напругу U_2 на ємності C_2 (вхідна ємність трансформатора) легко визначити з виразу балансу енергії:

$$C_2 \cdot U_0^2 / 2 + L_2 \cdot I_{CP}^2 / 2 = C_2 U_{2max}^2 / 2$$

або

$$U_{2max} = \sqrt{U_0^2 + L_2 \cdot I_{CP}^2 / C_2} ,$$

де U_0 – значення напруги на ємності C_2 у момент зрізу.

Наприклад, трансформатор з $U_{НОМ} = 110$ кВ та $S_{НОМ} = 31\,500$ кВА має струм холостого ходу близько 3 %, або 6,5 А, $L_2 = 50$ Гн і $C_2 = 10\,000$ пФ, або 10^{-8} Ф. У цьому випадку при відключенні холостого ходу такого трансформатора струм може бути обірваний на максимумі, тобто $I_{зр} = 6,5$ А, $U_0 = 0$ і

$$U_{2max} = \sqrt{L_2 \cdot I_{CP}^2 / C_2} = \sqrt{50 \cdot 6,5^2 / 10^{-8}} \approx 450 \text{ кВ} ,$$

що у 4,5 рази перевищує амплітуду фазної напруги.

Перенапруги зазвичай не досягають U_{2max} , оскільки в точці 1 (рисунок в), коли напруга U_2 стає рівною електричній міцності $U_{ВІД}$, що відновлюється між контактами вимикача, відбувається повторне запалення дуги у вимикачі. При цьому між контактами вимикача знову починає протікати струм i'_L і відбувається новий його зріз, але при менших значеннях, тому очікувана амплітуда перенапруг U'_{2max} знижується відповідно до наведеного вище виразу. Повторні запалювання дуги відбуваються кілька разів, поки максимум перенапруги U_{2max} , який поступово зменшується, не стане менше $U_{ВІД}$.

Таким чином, повторні запалювання дуги у вимикачі в даному випадку зменшують амплітуду можливих перенапруг, тому вони будуть більше при

застосуванні повітряних вимикачів, для яких наростання міцності $U_{ВД}$ відбувається швидше, ніж для масляних.

Так як перенапруги при відключенні індуктивностей досягають своєї граничної величини (4...5) U_{ϕ} лише в дуже рідкісних випадках і мають малу тривалість, яка не перевищує 0,1 с, то вони не представляють небезпеки для трансформаторів з нормальним рівнем ізоляції. Але оскільки в експлуатації завжди є трансформатори з ослабленою ізоляцією, і в даний час спостерігається тенденція до зниження рівнів ізоляції, особливо для обладнання надвисокої напруги, певний інтерес представляють способи обмеження таких перенапруг.

До таких способів відносяться, перш за все:

- збільшення ємності C_2 , включеної паралельно трансформатору, що відключається, наприклад, постійно включені ділянки кабелів;
- застосування вимикачів з шунтуючими високоомними (декілька кілоом) резисторами, які розсіюють енергію магнітного поля і демпфують коливання;
- відключення трансформаторів з боку низької напруги, де струм холостого ходу більше і ймовірність його передчасного “зрізу” менше;
- застосування розрядників, постійно включених на виводи трансформатора, причому можливе застосування стандартних грозових розрядників, оскільки енергія, що запасється в індуктивності, невелика і значно менше їх пропускну здатності.

Перенапруги, аналогічні вищерозглянутим, виникають при відключенні трансформаторів, що мають невелике індуктивне навантаження, а також при відключенні реакторів, що встановлюються на довгих лініях електропередачі.

Питання для самоперевірки

Контрольні питання до розділу 1

1. Чим відрізняються дуговий розряд від коронного?
2. Умови перетворення розряду у газі в самостійний.
3. Яка роль світіння початкової лавини у подальшому розвитку розряду?
4. Дати загальне формулювання закону Пашена.
5. Як змінюється коефіцієнт ударної іонізації з ростом напруженості поля?

Контрольні питання до розділу 2

1. Які фактори викликають зниження розрядної напруги на поверхні діелектрика?
2. В яких діелектриках вплив вологи проявляється особливо сильно?
3. Який механізм впливу забруднення на напругу перекриття по поверхні твердої ізоляції?
4. Для чого призначений внутрішній екран?
5. На що впливає поверхнева ємність діелектрика?

Контрольні питання до розділу 3

1. Дати визначення теплового пробиття I та II роду.
2. Перелічити основні заходи по зменшенню старіння ізоляції.
3. Як ведуть себе тверді включення у рідкому діелектрику? Чи змінюють вони його міцність?
4. Який із діелектриків більш знижує розрядну напругу газового проміжку при перекритті вздовж поверхні – фарфоровий чи парафіновий?
5. Як підвищити величину розрядної напруги рідкого діелектрика?

Контрольні питання до розділу 4

1. Перелічити засоби, які можна застосовувати для підвищення розрядної напруги вздовж поверхні ізолятора.
2. Довести, що напруга по елементах гірлянди ізоляторів розподіляється нерівномірно.
3. Дати визначення пробивної напруги ізолятора.
4. Порівняти конструкцію кабелю з масляним наповнювачем та кабелю з в'язким наповнювачем.
5. Особливості ізоляції обертових машин.

Контрольні питання до розділу 5

1. Які недоліки мають випробування ізоляції підвищеною напругою?
2. Які відміни випробувального трансформатора від силового?

3. Перелічити недоліки контролю ізоляції по опору.
4. Як проходить перемикання конденсаторів в ГНі?
5. Які перекручення викликають ділянки напруги і як вони зменшуються?

Контрольні питання до розділу 6

1. Довести, що хвильовий опір лінії не залежить від її довжини.
2. Який із параметрів стандартної хвилі є регулюємим?
3. Як зміниться хвильовий опір лінії при виникненні корони?
4. Як відбиваються хвилі струму та напруги від розімкнутого кінця лінії?
5. Чи може на схемі заміщення кабельна вставка у повітряній ЛЕП бути замінена ємністю або індуктивністю?
6. Які дії може чинити вставка на проходження хвиль?

Контрольні питання до розділу 7

1. Яка основна причина нерівномірного розподілу напруги по обмотці трансформатора при набіганні хвиль?
2. Чи можлива поява перенапруг на інших обмотках при падінні хвиль на одну з них?
3. В яких містах системи електропостачання відбувається відбиття хвиль?
4. Як зменшити перенапругу, що виникає при переході хвиль з однієї обмотки трансформатора на другу?
5. Чим відрізняється вплив імпульсів напруги на обмотки обертових машин?

Контрольні питання до розділу 8

1. Який із параметрів блискавки є найбільш вивченим? В яких межах він знаходиться?
2. Від чого залежить величина струму, що протікає крізь уражений блискавкою об'єкт?
3. Пояснити механізм виникнення магнітної складової перенапруги при ударі блискавки поблизу ЛЕП.
4. Який із розмірів блискавичника називають активною висотою?
5. Від якого параметра блискавичника залежить радіус захисної зони?

Контрольні питання до розділу 9

1. Обґрунтувати необхідність нелінійного опору вентильного розрядника.
2. Що таке залишкова напруга розрядника?

3. Які розрядники використовують для грозозахисту обертових машин? Чим вони відрізняються від звичайних?
4. Які струми течуть крізь розрядник (розмежування їх у часі)?
5. Яким повинний бути опір розрядника?

Контрольні питання до розділу 10

1. В яких випадках на ГПП встановлюють додатковий вентиляльний розрядник?
2. Які заходи застосовують для поліпшення грозозахисту обертових машин?
3. В яких випадках застосовується захисний підхід при грозозахисті підстанцій?
4. Як буде працювати грозозахист, якщо вентиляльний розрядник на шинах ГПП–35 замінити трубчастим?
5. Особливості схем грозозахисту цехових підстанцій.

Контрольні питання до розділу 11

1. За якими критеріями вибирають та порівнюють режими заземлення нейтралі електричних систем?
2. Чому для систем 6–35 кВ віддають перевагу ізольованій нейтралі?
3. Яке заземлення нейтралі називають ефективним?
4. Які недоліки має глухе заземлення нейтралі?
5. Вказати область використання резонансного заземлення нейтралі.
6. Порівняти ізольовану нейтраль з резонансно заземленою.

Контрольні питання до розділу 12

1. Навести приклади внутрішніх перенапруг в ЛЕП.
2. Для яких електроустановок і при яких напругах найбільшу небезпеку становлять внутрішні перенапруги?
3. Якої величини досягає перенапруга при відключенні ненавантажених ліній?
4. Яку небезпеку становлять дугові замикання на землю?
5. Які особливості перенапруг, що виникають при відключенні індуктивностей?

Література

1. Баби́ков М.А., Кома́ров Н.С., Серге́ев А.С. Техника высоких напряжений. М. –Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 671 с.
2. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
3. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Василець С. В., Василець К. С. Техніка високих напруг: навчальний посібник [Електронне видання]. – Рівне: НУВГП, 2018. – 187 с.
5. Долгинов А.И. Грозозащита электрических установок. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 240 с.
6. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968. – 464 с.
7. Иерусалимов М.Е., Орлов Н.Н. Техника высоких напряжений / Под общ. ред. М.Е. Иерусалимова. Киев: Изд-во Киевского университета, 1967. – 444 с.
8. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 54 с.
9. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях: учеб. пособ./ Гуль В. И. и др.; под. ред. проф. Гуля В. И. Харьков: ЭДЭНА, 2009. – 270 с.
10. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
11. Ларионов В.П. и др. Техника высоких напряжений: Учеб. для техникумов / В.П. Ларионов, В.В. Базуткин, Ю.Г. Сергеев; Под. ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоиздат, 1986. – 296 с.
12. Маврін О.І., Покровський К.Б. Техніка та електрофізика високих напруг: Консп. лекцій. Львів, Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2009. – 116 с.
13. Мирдель Г. Электрофизика. – М.: Мир, 1972. – 608 с.
14. Перенапряжения в сетях 6-35 кВ / Гиндуллин Ф. А., Гольдштейн В. Г., Дульзон А. А., Халилов Ф. Х. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
15. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР . – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
16. Рой В. Ф. Конспект лекцій з курсу «Техніка високих напруг» (для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» (0906 «Електротехніка») зі спеціальності «Електротехнічні системи електроспоживання» та слухачів другої вищої освіти) / В. Ф. Рой; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2009. – 170 с.
17. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Выпуск третий. Перенапряжения и защита от перенапряжений. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1945. – 551 с.

18. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. Часть третья. Выпуск первый. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 368 с.
19. Степанчук К.Ф., Тыняков Н.А., Техника высоких напряжений: [Учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Выш. школа, 1982. – 367 с.
20. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В.Костенко. М.: Высш. шк., 1973. – 528 с.
21. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения/ Пер. с нем. М. Байер, В. Бек и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
22. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей ред. Д.В. Разевига. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. – 488 с.
23. Техніка і електрофізика високих напруг: навч. посібник / Бржезицький В. О. та ін. ; за ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. Харків: НТУ «ХП». Торнадо, 2005. – 930 с.
24. Федченко И.К. Техника высоких напряжений. – Киев: Вища школа, 1969. – 544 с.
25. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. – М. : Энергия, 1973. – 233 с.
26. Юриков П. А. Защита электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии. – М.: Энергоиздат, 1982. – 88 с.
27. ГКД 34.20.302 Норми випробування електрообладнання. Київ, 2004. – 217 с.
28. ГКД 34.35.512 Средства защиты от перенапряжения в электроустановках 6-750 кВ. Киев, 2004. – 134 с.
29. ГОСТ 1516.2–76. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 3 до 500 кВ. Требования и методы испытаний электрической прочности изоляции. – М.: Изд-во стандартов, 1977.
30. Arora R., Mosch W. High voltage and electrical insulation engineering. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 392 p.
31. Farouk A. M. Rizk, Giao N. Trinh High voltage engineering. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 804 p.
32. High-voltage engineering and testing. 3rd ed., edited by Hugh M. Ryan. London: The Institution of Engineering and Technology, 2013. – 960 p.
33. Wadhwa C. L. High voltage engineering / Wadhwa C. L., 2d ed. New Delhi: New Age International (P) Limited, publishers, 2007. – 312 p.
34. Advances in high voltage engineering. Edited by A. Haddad and D. F. Warne. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007. – 669 p.

Зміст

Вступ.....	3
1 Розряди в газах.....	4
1.1 Види розрядів та іонізацій у газах.....	4
1.2 Лавина електронів.....	6
1.3 Самостійний розряд.....	8
1.4 Розряд у однорідному полі. Закон Пашена.....	10
1.5 Розряд у слабо неоднорідному полі.....	12
1.6 Розряд у різко неоднорідному полі.....	12
1.7 Розряди в газах при імпульсних напругах.....	16
2 Електричні розряди на поверхні діелектрика.....	19
2.1 Діелектрик розташований в однорідному полі паралельно силовим лініям.....	19
2.2 Діелектрик у неоднорідному полі.....	21
2.3 Діелектрики в різко неоднорідному полі.....	21
3 Розряди в рідкій, твердій і комбінованій ізоляції.....	22
3.1 Рідкі діелектрики.....	22
3.2 Пробій твердих діелектриків.....	24
3.3 Комбінована ізоляція.....	25
3.4 Засоби, що підвищують міцність ізоляції.....	27
3.5 Запобігання старіння ізоляції.....	28
4 Ізоляційні конструкції.....	29
4.1 Ізолятори високої напруги.....	29
4.1.1 Класифікація та конструкції ізоляторів.....	29
4.1.2 Розподіл напруги уздовж гірлянди ізоляторів.....	32
4.1.3 Основні характеристики ізоляторів.....	33
4.1.4 Вибір ізоляторів для ліній і РП.....	34
4.2 Ізоляція кабельних ліній.....	35
4.2.1 Кабелі з в'язким просоченням.....	36
4.2.2 Маслонаповнені кабелі.....	37
4.2.3 Газонаповнені та інші кабелі.....	38
4.3 Ізоляція трансформаторів.....	39
4.4 Ізоляція обертових машин.....	40
5 Профілактичні випробування ізоляції.....	41
5.1 Схеми заміщення діелектриків.....	42
5.2 Контроль ізоляції за опором (струмом провідності).....	44
5.3 Контроль ізоляції за діелектричними втратами.....	45
5.4 Ємнісні методи контролю ізоляції.....	47
5.4.1 Метод «ємність – частота».....	47
5.4.2 Метод «ємність–температура».....	48
5.5 Інші методи контролю ізоляції.....	48
5.6 Випробування ізоляції підвищеною напругою.....	49
5.7 Особливості випробувань різних ізоляційних конструкцій.....	50
5.7.1 Лінійна ізоляція.....	50

5.7.2	Трансформатори.....	51
5.7.3	Обертіві машини.....	51
5.8	Випробні трансформатори.....	51
5.9	Високовольтні іспитові установки постійної напруги.....	54
5.10	Генератори імпульсних напруг.....	55
5.11	Генератор імпульсних струмів.....	56
5.12	Високовольтні виміри.....	57
5.13	Дільники напруги.....	59
6	Хвильові процеси в ЛЕП.....	60
6.1	Заломлення і відбиття хвиль.....	60
6.2	Проходження хвиль через індуктивності та ємності.....	62
6.3	Хвильові процеси в багатопрвідній лінії без втрат.....	64
6.4	Багаторазові відбиття хвиль.....	65
6.5	Багаторазові відбиття хвиль довільної форми.....	67
6.6	Викривлення і загасання хвиль.....	68
7	Хвильові процеси в електричних машинах.....	70
7.1	Первісний розподіл напруги уздовж обмотки трансформатора...	70
7.2	Коливання в обмотках трансформаторів.....	73
7.3	Перехід хвиль із однієї обмотки на іншу.....	74
7.4	Особливості перехідних процесів в трифазних трансформаторах.....	75
8	Блискавка як джерело перенапруг.....	77
8.1	Електричні характеристики блискавки.....	77
8.2	Характеристика грозової діяльності.....	78
8.3	Захист від прямих ударів блискавки за допомогою блискавковідводів.....	80
8.4	Будова блискавковідводів.....	84
8.5	Індуковані перенапруги.....	86
8.6	Перенапруги ПУБ в ЛЕП без тросів у системі із заземленою нейтраллю.....	87
8.7	Перенапруги ПУБ у ЛЕП без тросів у системі з ізольованою нейтраллю.....	88
8.8	Перенапруги ПУБ в ЛЕП з тросовим захистом.....	89
9	Грозозахист ЛЕП і споруд.....	92
9.1	Принцип дії. Загальні вимоги до розрядників.....	92
9.2	Устрій і характеристики розрядників.....	93
9.2.1	Прості захисні проміжки (ПЗ).....	93
9.2.2	Трубчасті розрядники (РТ).....	93
9.2.3	Вентильні розрядники (РВ).....	95
9.2.4	Нелінійні обмежувачі перенапруг (ОПН).....	96
9.3	Захист повітряних ЛЕП.....	97
9.4	Захист будівель і споруд від ПУБ.....	98
9.5	Грозозахист підстанцій.....	99
9.5.1	Захист підстанцій від ПУБ.....	100
9.5.2	Розрахункові параметри хвиль. Показник грозоупорності підстанцій.....	101

10	Схеми грозозахисту підстанцій від хвиль, що набігають з ЛЕП.....	101
10.1	ГЗП 35...220 кВ.....	101
10.1.1	Лінії без тросового захисту на металевих опорах.....	101
10.1.2	Лінії з тросовим захистом по всій довжині.....	102
10.1.3	ГЗП 35...110, виконані за спрощеною схемою при підключенні до діючих ліній.....	102
10.2	Цехові підстанції.....	104
10.2.1	Цехові знижувальні підстанції глибокого уводу 35 кВ з трансформаторами до 630 кВА.....	104
10.2.2	Цехові трансформаторні підстанції та РП з повітряними лініями, що живлять (6...10 кВ).....	104
10.2.3	Цехові трансформаторні підстанції та РП з повітряними лініями, що живлять через кабельні вставки.....	105
10.3	Грозозахист обертових машин.....	105
10.3.1	Генератор підключений безпосередньо до ПЛ.....	106
10.3.2	Генератор підключений до ПЛ через реактор і кабельну вставку.....	106
10.3.3	Генератор підключений до ПЛ через реактор.....	107
10.3.4	Захист електродвигунів потужністю до 3000 кВт.....	107
10.3.5	Захист електродвигунів потужністю до 3000 кВт при наявності кабельної вставки.....	108
10.4	Захист струмопроводів від ПУБ.....	108
10.5	Захист ГЗП 35...220 кВ від набігаючих хвиль по лініях НН.....	108
11	Режими заземлення нейтралі електричних систем.....	109
11.1	Глухозаземлена нейтраль.....	110
11.2	Ефективно заземлена нейтраль.....	111
11.3	Неефективно заземлена нейтраль.....	112
11.4	Ізольована нейтраль.....	112
11.5	Резонансно заземлена нейтраль.....	112
11.6	Включення дугогасних катушок.....	115
12	Внутрішні перенапруги.....	117
12.1	Перенапруги при КЗ в системах з ізольованою нейтраллю.....	117
12.2	Перенапруги при дугових замиканнях на землю.....	119
12.3	Перенапруги при відключенні ліній.....	121
12.4	Обмеження перенапруг.....	123
12.5	Перенапруги при відключенні індуктивностей.....	124
	Питання для самоперевірки.....	127
	Література.....	130

Навчальне видання

**Корольов Анатолій Михайлович
Степаненко Юрій Вікторович**

ТЕХНІКА ВИСОКИХ НАПРУГ

Навчальний посібник