

Техніка
високих напруг
(ТВН)

Метою курсу «Техніка високих напруг» є вивчення:

- процесів, які відбуваються в ізоляції (електротехнічних матеріалах) при дії високих напруг та сильних електромагнітних полів з урахуванням дії навколишнього середовища;
- характеристик електричної міцності ізоляції електрообладнання (ЕО) при різному характері прикладеної напруги;
- конструкцій ізоляційних пристроїв високовольтного електрообладнання;
- особливостей грозових і комутаційних перенапруг та способів протидії негативному впливу їх на функціональні характеристики ізоляційних конструкцій високовольтного ЕО;
- методів профілактичного контролю і випробування ізоляції різних типів енергетичного ЕО.

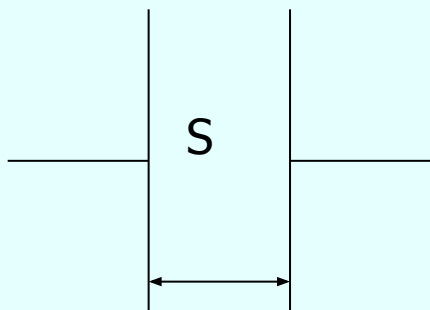
ПРИКЛАДИ

ТВН виникла в зв'язку з необхідністю електропередачі великих електричних потужностей на далекі відстані:

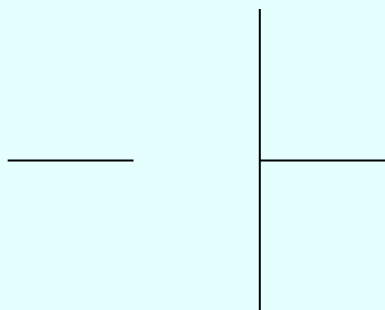
$$P=U*I$$

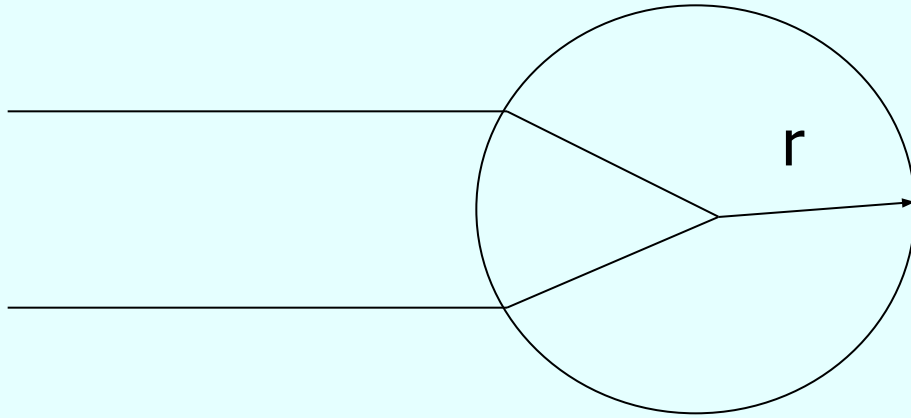
1. $S=2$ см, $U= 20$ кВ, E -?

$$E=U/S=10 \text{ кВ/см}$$



2. На якій відстані від голки буде $E=10$ кВ/см, якщо на голку подати $U=220$ В ?





Для сфери: **$E=U/r$** .

Звідки $r=0,022$ см.

3. Нехай радіус голки $r=10^{-4}$ см, U на голці 20 кВ. E -?

$$E=20 \text{ кВ}/10^{-4} \text{ см} = 2 \cdot 10^5 \text{ кВ/см}$$

Література

1. Техніка високих напруг : [Навчальний посібник] / О.В. Гай, Кулик Б.І. – Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України. 2021. – 712 с.
2. Техніка та електрофізика високих напруг: Навч. посібник / за ред. В.О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ “ХПІ” – Торнадо, 2005 – 930с.
3. Техника высоких напряжений: Учебное пособие / К.Ф. Степанчук Н.А. Тиняков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высшая школа, 1982, – 363с.

Методична література

1. Техніка та електрофізика високих напруг. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів спеціальності 6.090600 “Електричні системи і мережі”. / Укл.: Хомініч В.І., Кулик Б.І., Гай О.В. – Чернігів: ЧДТУ, 2007 – 58 с.

РОЗРЯДИ В ГАЗАХ

В різних електроізоляційних конструкціях в якості діелектриків широко використовуються гази. Це насамперед повітря, елегаз (SF₆), азот. До них слід віднести також вакуум.

Перевагами газової ізоляції є:

- - висока електроізоляційна міцність;
- - стабільність характеристик у процесі експлуатації;
- - відносна пожежна безпека;
- - простота конструкцій електрообладнання.

Недоліками повітря як ізоляції є утворення озону при електричному розряді, що призводить до посилення корозії металевих частин електрообладнання, а також залежність його електричної міцності від атмосферних чинників:
.вологості, температури, тиску, забруднення

Недоліками елегазу є обмеження застосування через його скраплення при нормальному тиску і температурі – 45°C. Для зниження робочої температури елегазу до нього додають 6% азоту, що розширює робочий діапазон елегазової ізоляції до мінус -60°C.

Повітря є **ОСНОВНИМ ВИДОМ** зовнішньої ізоляції ліній електропередачі, енергетичного устаткування і високовольної техніки, тому необхідно знати як впливають на його електричну міцність:

- форма і тривалість дії напруги;
- конфігурація електричного поля;
- тиск і температура навколишнього середовища.

Виникає потреба в чисельних оцінках електричної міцності повітряних проміжків на основі розрахункових моделей, які достовірно відображатимуть закономірності розвитку розряду в повітрі, так як створення постійних натурних моделей є матеріалозатратним.

Конфігурація електричних полів

Ізольовані електроди ЕО (шини розподільчих пристроїв, проводи ліній електропередач, зовнішні струмовідні частини електричних апаратів і т.п.) створюють електричні поля різної конфігурації.

- Від форми електричного поля залежить електрична міцність і пробивна напруга ізолюючих проміжків.

Електричні поля за конфігурацією поділяються на:

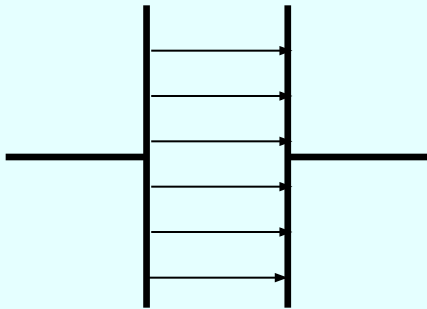
- **однорідні,**
- **слабонеоднорідні,**
- **різконеоднорідні.**

Однорідним полем є поле між двома плоскопаралельними електродами (в якому лінії напруженості електричного поля паралельні).

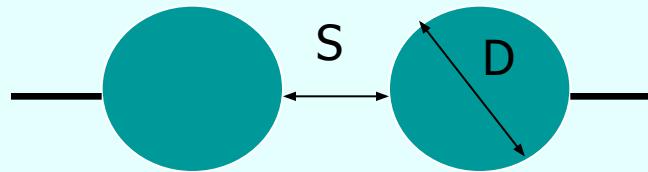
Слабонеоднорідне поле реалізується в системі електродів "куля-куля", але при умові, що відстань між електродами **S** менше діаметра кулі **D** (**S < D**).

однорідне

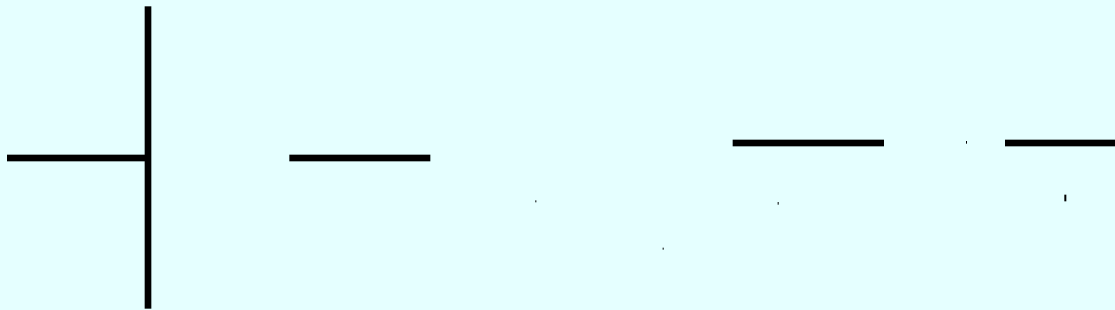
E



слабонеоднорідне



Різконеоднорідне поле виникає в системі електродів “площина–стержень” або “стержень-стержень”.



Ступінь неоднорідності електричного поля між електродами характеризується **коефіцієнтом неоднорідності K_n** :

$$K_n = E_{\max} / E_{\text{сер}},$$

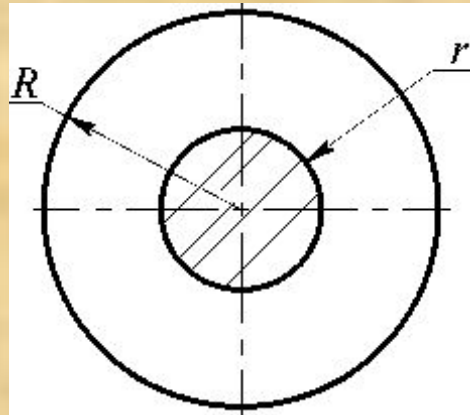
де **E_{\max}** – максимальна напруженість електричного поля,
 $E_{\text{сер}}$ – середня напруженість електричного поля між електродами.

Середня напруженість є відношення напруги **U** (прикладеної до електродів) до відстані між електродами **S** :

$$E_{\text{сер}} = U / S.$$

Максимальна напруженість залежить від прикладеної до електродів напруги, конфігурації, розмірів електродів і відстані між ними.

Наприклад, для коаксіальних циліндрів (кабель):



$$E_{\max} = U / (r * \ln(R/r))$$

$$E_{\text{ср}} = U / (R - r)$$

$$K_H = (R - r) / (r * \ln(R/r))$$

$K_n=1$ для однорідного поля

$K_n \leq 3$ для слабонеоднорідного поля

$K_n > 3$ для різконеоднорідного поля

Розрізняють симетричну і несиметричну систему електродів.

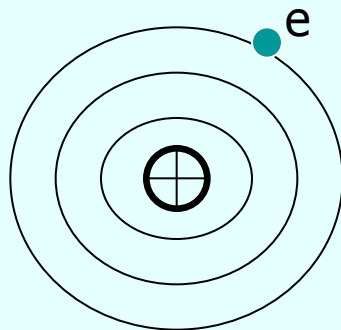
Симетрична - електроди мають однакову форму і розміри і відсутнє заземлення будь-якого з них.

Несиметрична - електроди мають різну конфігурацію (різні розміри) або один з них заземлений.

Пробивні напруги в несиметричній системі електродів нижчі, ніж у симетричній.

Іонізаційні процеси в газах

Атоми газу в нормальному стані є нейтральними частинками і знаходяться в хаотичному тепловому рівномірному русі, які зіштовхуючись між собою втрачають енергію. Структура атома згідно з планетарною моделлю складається з позитивно зарядженого ядра (протона), навколо якого на стаціонарних орбітах, що відповідають певним енергетичним рівням, знаходиться відповідна кількість негативно заряджених електронів, які компенсують заряд ядра. Атом є нейтральним.



Маса **e** набагато менша маси іона ($m_e=9,1*10^{-28}$ г, $m_i=1,7*10^{-24}$ г), звідси швидкість **e** по відношенню до швидкості іона дуже велика.

- Коли електрон віддаляється від ядра настільки, що взаємодія його з ядром практично зникає, то електрон стає вільним. Відбувається іонізація атома, у результаті якої утворюються дві незалежні частки: електрон і позитивний іон.

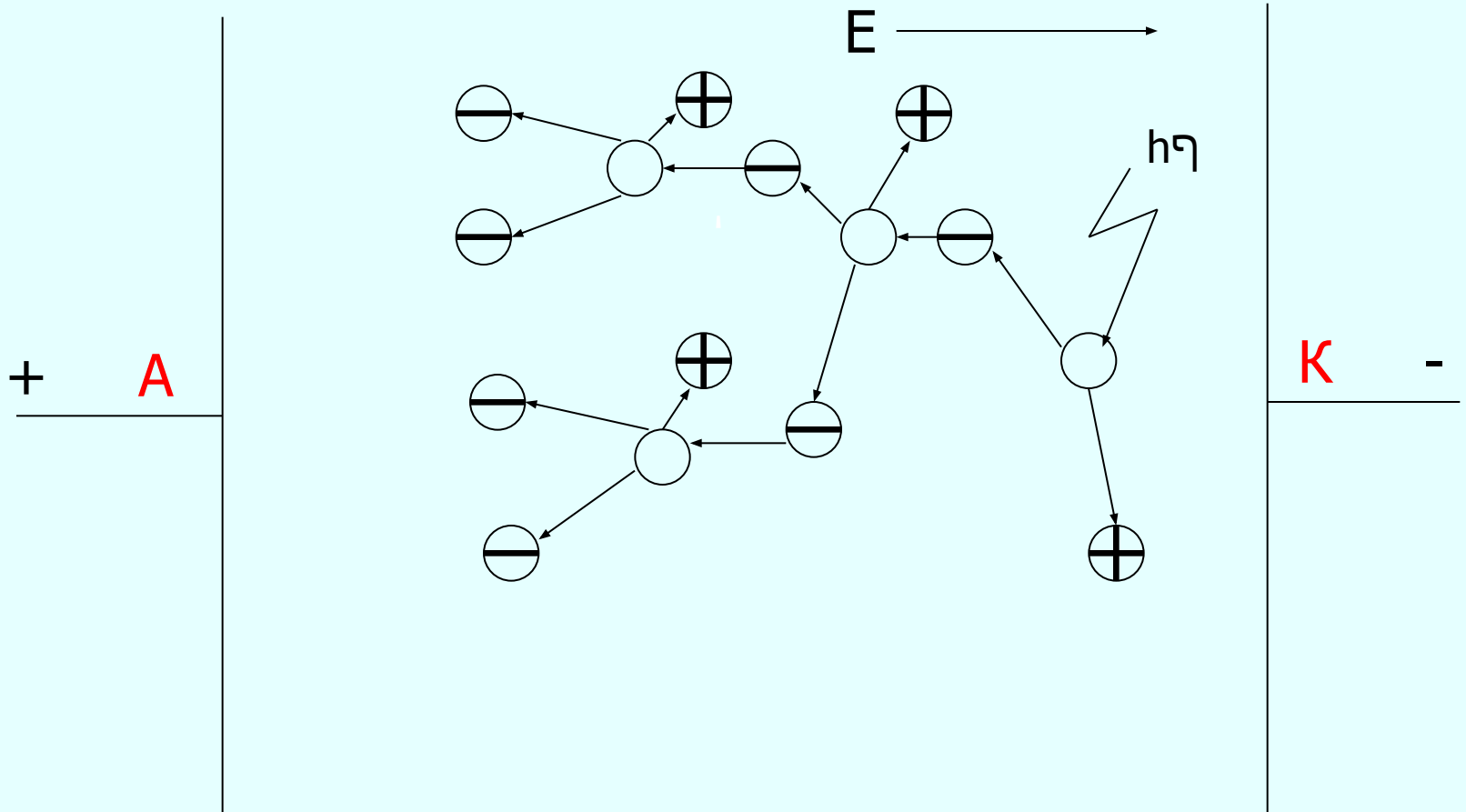
Іонізацією називається процес утворення в газовому середовищі частинок, які несуть позитивний або негативний електричний заряд.

■ Іонізація може проходити як процес перетворення нейтральних частинок в газовому середовищі - **об'ємна іонізація** і як процес появи заряджених частинок в міжелектродному просторі ззовні - **поверхнева іонізація**.

■ Іонізація газу є необхідною умовою виникнення електричних розрядів в ньому при дії зовнішнього електричного поля.

■ В теорії **Таунсенда** виникнення електричних розрядів в газі пояснюється наступним чином: під дією природних іонізаторів в газовому середовищі виникають вільні заряджені частинки, які грають роль "запальних" зарядів у процесі пробою. При достатньо високих **E** вільні **e**, рухаючись від катода до анода, зіштовхуються з атомами газу, проводять ударну іонізацію, в результаті якої виникають нові вільні заряди. Вибиті при ударній іонізації **e** під дією **E** прискорюються і також приймають участь в іонізації.

Кількість вільних e , які рухаються до аноду збільшується і виникає лавина e .



Енергія іонізації (W_i) – це енергія, необхідна для видалення хоча б одного e із нейтрального атома. Вимірюється в електронвольтах (eV).

Вільний електрон у сильному електричному полі набуває кінетичної енергії W_e . Якщо ця енергія більша за енергію іонізації $W_e > W_i$, то при зіткненні електрона з нейтральним атомом відбувається передача цієї енергії атому, внаслідок чого його електрони переходять на більш віддалені орбіти, а електрони зовнішньої орбіти відриваються від атома. Цей процес називають ударною іонізацією.

Позитивні іони рухаючись до катоду, вивільняють (вибивають) з поверхні катода e , які утворюють нову лавину. Ці процеси приводять до різкого збільшення провідності і струму в проміжку, який і сигналізує про виникнення електричного розряду в газовому проміжку.

Інтенсивність іонізації газу при заданому значенні E визначається:

Енергією іонізації конкретного газу;

Середньою довжиною вільного пробігу частинки в цьому газі.

Енергія іонізації залежить від заповнення електронних орбіт атома електронами (від виду газу).

Газ	H ₂	N ₂	O ₂	SO ₂	CO	NO
W _i ,eV	15,4	15,6	12,1	12,3	14	9,2

Середня довжина вільного пробігу частинки в газі (λ) – відстань яку проходить частинка без співударянь в газовому проміжку.

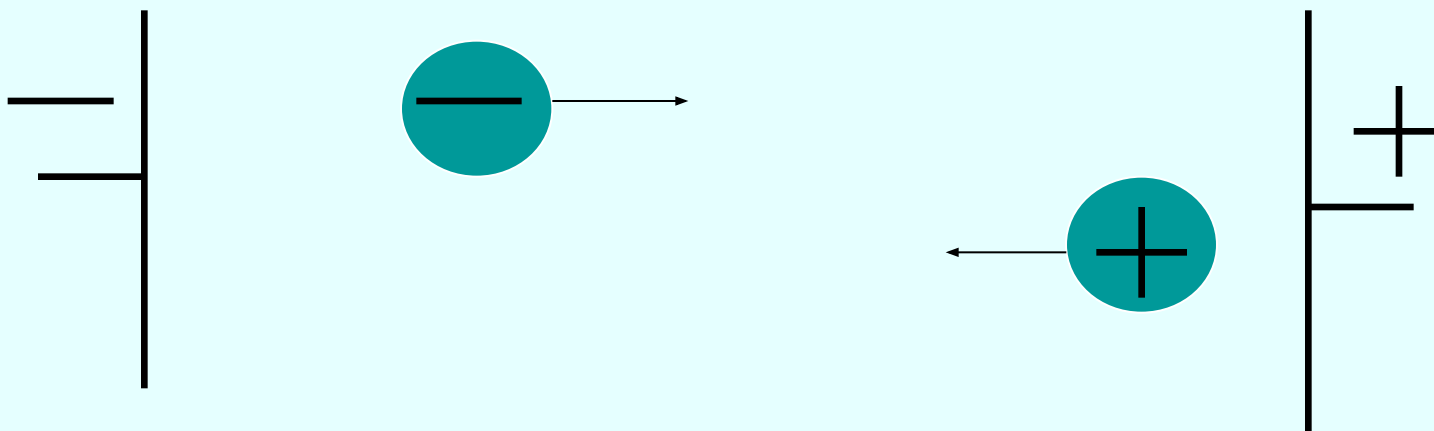
Інтенсивність розмноження e в лавині характеризується коефіцієнтом ударної іонізації (α) – кількість іонізацій, які чинить електрон на шляху 1 см в напрямку дії електричного поля.

Деіонізаційні процеси в газах

Одночасно з іонізацією в газі неминуче відбуваються процеси нейтралізації заряджених частинок: **рекомбінація** та **дифузія**.

Ці процеси ведуть до збільшення електричної міцності газових проміжків.

Для рекомбінації необхідно, щоб швидкість руху частинок була невеликою, так як при великих швидкостях частинки вільно пролітають одна мимо іншої. Рекомбінація може пройти в тому випадку, якщо потенційна енергія частинок, що зближуються, більше кінетичної.



Закон зміни кількості іонів в деякий момент часу в одиниці об'єму газу внаслідок рекомбінації:

$$N = n_0 / (1 + \rho n_0 t),$$

де N – концентрація іонів в деякий момент часу;

n_0 – початкова концентрація іонів;

ρ – коефіцієнт рекомбінації (для іонів $\rho = 1,6 \times 10^{-6} \text{ см}^3/(\text{іон} \cdot \text{с})$, для електронів – $10^{-10} \text{ см}^3/(\text{електрон} \cdot \text{с})$);

t – час.

Дифузія або розсіювання іонів виникає в результаті їх хаотичного теплового руху. Іони переміщуються із області великої їх концентрації в область меншої, розподіляючись рівномірно по всьому об'єму.

Дифузійні процеси характеризує **коефіцієнт дифузії**:

$$D = \lambda * V_{\text{ср}} / 3,$$

- де λ – середня довжина вільного пробігу,
- $V_{\text{ср}}$ – середня швидкість руху частинок.

Внаслідок дії двох протилежних процесів — іонізації і рекомбінації — встановлюється рівноважний стан, при якому в одиницю часу виникає і рекомбінує певна кількість заряджених часток. Цей рівноважний стан характеризується певним ступенем іонізації газу, тобто відношенням концентрації іонізованих часток до загальної концентрації часток:

$$K_{\text{іон}} = n_{\text{іон}} / N_{\Sigma}$$

де $K_{\text{іон}}$ — коефіцієнт ступеня іонізації газу;

$n_{\text{іон}}$ — концентрація іонізованих часток;

N_{Σ} — загальна концентрація часток (для повітря $N_{\Sigma} \approx 10^{22}$ атомів на 1 см^3).

Газ, у якому значна частина атомів і молекул іонізована, називається **плазмою** ($n_{\text{іон}} \geq 10^{12} \div 10^{14}$ іонів на 1 см^3). Концентрація позитивних і негативних зарядів у плазмі приблизно однакова. **Плазма** — форма існування речовини при температурі приблизно 5000 K і вище.

Види іонізації

Розрізняють об'ємну і поверхневу іонізації.

- **Об'ємна іонізація** - утворення заряджених часток в об'ємі газу між електродами.
- **Поверхнева іонізація** - випромінювання (емісія) заряджених часток з поверхні електродів.

Об'ємна іонізація поділяється:

- ударна іонізація;
- ступінчаста іонізація;
- фотоіонізація;
- термоіонізація.

(Самостійно)

Лавинні процеси в газах

У процесі розвитку лавини одночасно з електронами утворюються позитивні іони. Рухливість іонів значно менше, ніж електронів, і за час розвитку лавини вони практично не встигають переміститися в проміжку до катода.

Після проходження лавини електронів у газі залишаються позитивні, а в електронегативних газах і негативні іони, які спотворюють (зменшують або збільшують) зовнішнє електричне поле в проміжку.

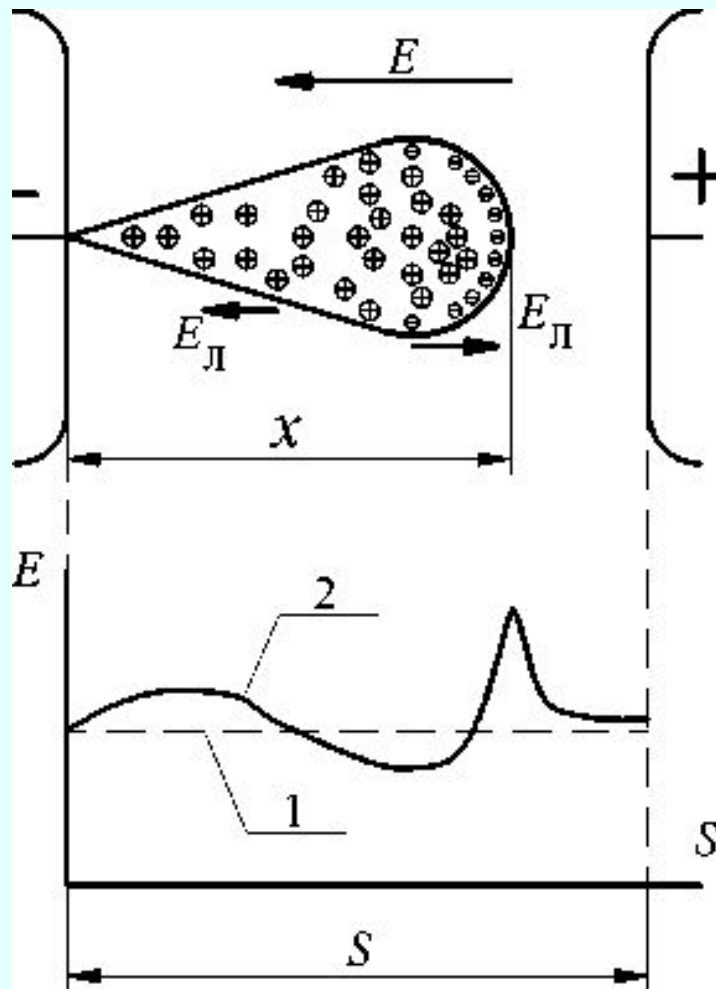


Рисунок 1 - Викривлення лавиною електричного поля в проміжку:
 1 - середня напруженість без лавини; 2 - результуюча напруженість;
 E_L - напруженість лавини

Кількісна характеристика лавини

Для опису лавинного процесу необхідно визначити число електронів у лавині.

Припустимо, що з катода за рахунок зовнішнього іонізатора виривається n_0 електронів (наприклад $n_0 = 1$). На відстані x від катода число електронів зросло до n (рисунок2).

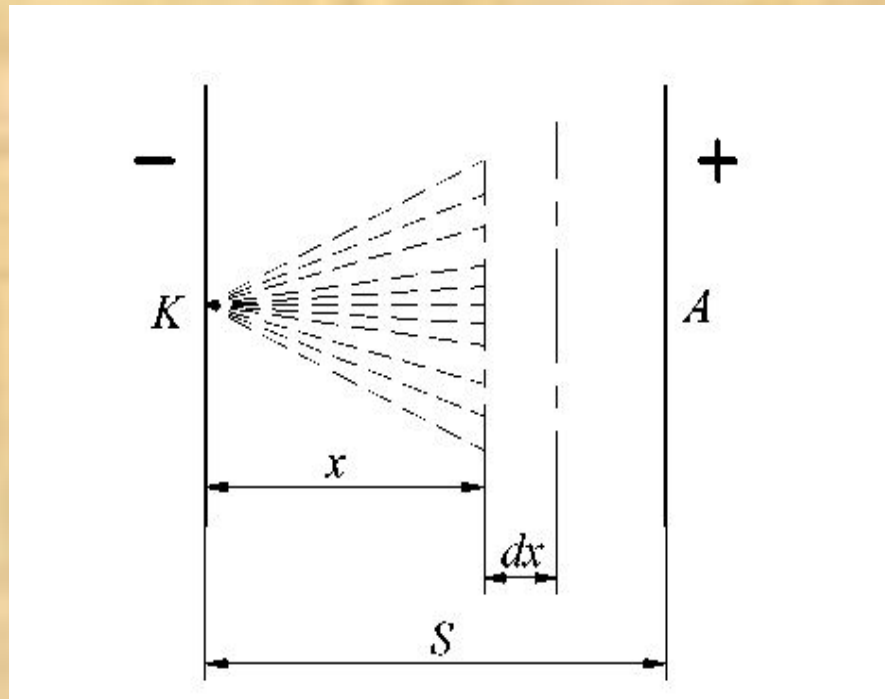


Рисунок 2 - Схема визначення числа електронів у лавині

Збільшення числа електронів dn на шляху dx можна виразити:

$$dn = n \cdot a \cdot dx, \quad (1.1)$$

де a – коефіцієнт ударної іонізації. Тоді:

$$dn/n = a \cdot dx. \quad (1.2)$$

Інтегруючи ліву частину (1.2) по n від 1 до n і праву по x від 0 до x , та враховуючи, що в однорідному полі коефіцієнт ударної іонізації $a = \text{const}$ (напруженість у будь-якій точці проміжку однакова), одержимо:

$$\ln n = ax. \quad (1.3)$$

Звідки:

$$n = e^{ax} \quad (1.4)$$

Вираз (1.4) дає значення кількості електронів у лавині без врахування їх прилипання до нейтральних атомів і молекул. Це явище характеризується коефіцієнтом прилипання η .

Коефіцієнт прилипання залежить від роду газу (електро-негативний або електропозитивний), тиску, температури.

Тоді число електронів у лавині з урахуванням прилипання буде:

$$n = e^{(\alpha - \eta)x} . \quad (1.5)$$

Якщо $n_0 > 1$, то:

$$n = n_0 e^{(\alpha - \eta)x} . \quad (1.6)$$

Умова самотійності розряду

Після проходження першої лавини в проміжку лавинний процес може поновлюватися, а може і затухнути.

Для поновлення лавинного процесу потрібний хоча б один вторинний ефективний електрон.

Якщо цей електрон з'являється у результаті дії зовнішнього іонізатора - розряд називається несамотійним.

Якщо ж вторинний ефективний електрон виникає в результаті проходження первинної лавини - розряд називається самотійним.

Розряд з несамоствійного може перейти в самоствійний, якщо збільшити прикладену до електродів напругу.

При самоствійній формі розряду лавинний процес відновлюється, оскільки сама первинна лавина (і наступні вторинні теж) створює **умови для поновлення процесу**:

- позитивні іони, що залишилися після проходження лавини, рухаючись до катода, бомбардують його і викликають емісію електронів з катода;
- збуджені атоми і молекули, що утворюються поряд з іонізацією, випускають фотони, що можуть приводити як до фотоіонізації в проміжку, так і до фотоемісії електронів з катода.

Кількість позитивних іонів, що залишилися в проміжку після проходження лавини, дорівнює кількості електронів у лавині, крім початкового електрона, тобто:

$$n_{\text{іон}+} = e^{(\alpha-\eta)S} - 1 \quad (1.7)$$

де S – відстань між електродами.

Електрони, вибиті з катода, не усі беруть участь в утворенні вторинних лавин. Частина електронів рекомбінує з позитивними іонами.

Сумарний процес утворення вторинних електронів з катода характеризується коефіцієнтом вторинної іонізації γ , який залежить від матеріалу катода, складу і тиску газу і завжди $\gamma \ll 1$.

Кількість вторинних електронів, утворених після проходження первинної лавини при самотійній формі розряду, повинна бути не менш 1:

$$\gamma(e^{(\alpha-\eta)S} - 1) \geq 1 \quad (1.8)$$

Умова (1.8) – умова самотійності розвитку розряду в газовому проміжку

Види розрядів в газах

В електроустановках високих напруг практично існують наступні розряди:

- **Іскровий**
- **Коронний**
- **Дуговий**

(Самостійно)

■ Стримерна теорія розряду

- У процесі розвитку лавини безперервно збільшується число e і позитивних іонів. Зі збільшенням числа e в голові лавини зростає напруженість на її фронті (рисунок 3). В хвості лавини напруженість знижена. e в голові лавини зупиняються і можуть рекомбінувати з іонами. При рекомбінації випромінюються фотони, які здатні поблизу хвоста первинної лавини іонізувати нейтральні молекули, утворити вторинні лавини.
- Вторинні лавини, слідуючи по силових лініях і маючи в голові надлишковий негативний заряд (електрони), втягуються в область позитивного об'ємного заряду, залишеного первинною лавиною.
- Електрони вторинних лавин змішуються з позитивними іонами первинної лавини й утворюють **стример** - область з найбільшою щільністю струму, яка розігріваючись починає світитися, а найбільша концентрація часток (щільність струму) утвориться поблизу катода.

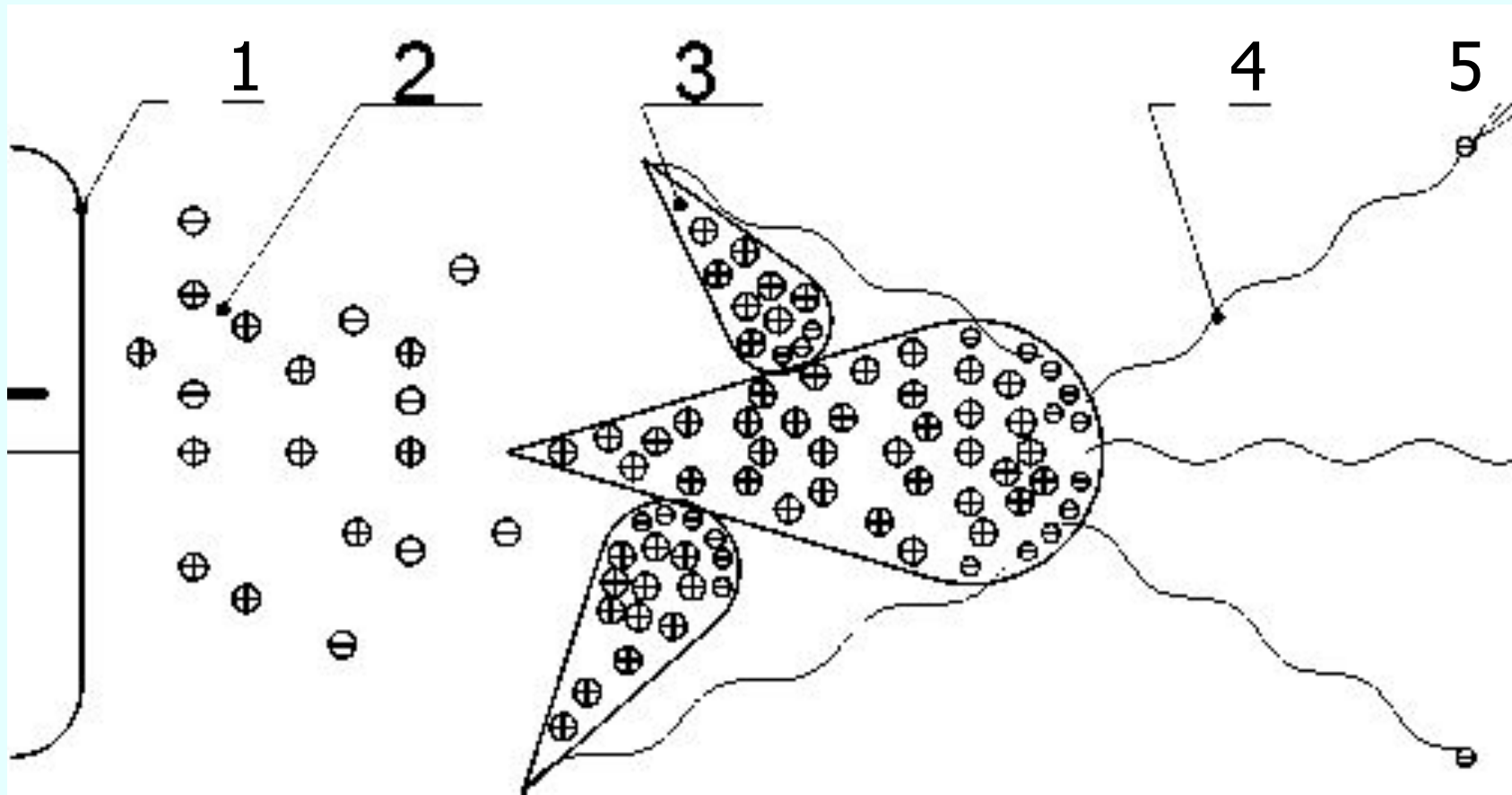


Рисунок 3 - Механізм розвитку катодного стримера: 1 - електрод-катод, 2 - канал стримера, 3 - лавини, 4 - рух фотонів, 5 - електрон за рахунок фотоіонізації

Для фотоіонізації в об'ємі газу енергія фотонів повинна бути більше енергії іонізації

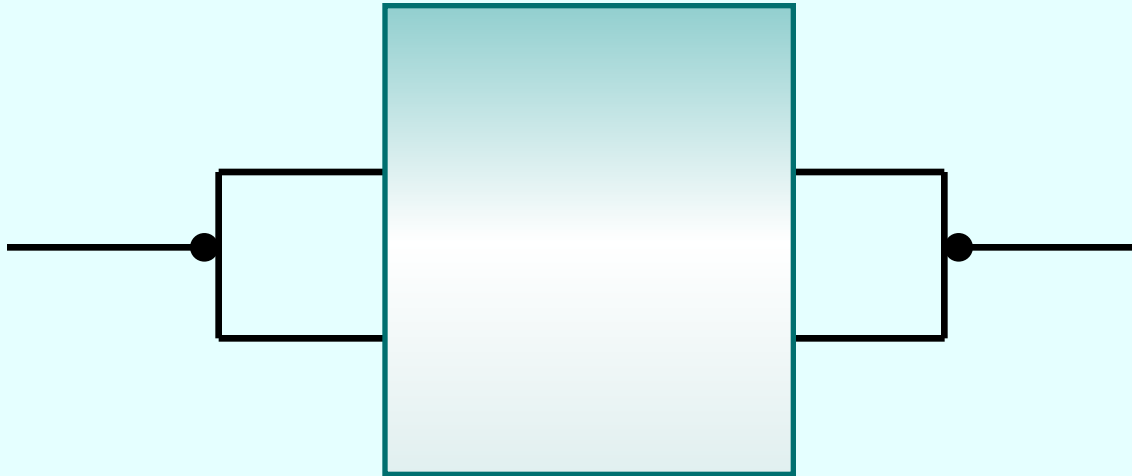
Критерієм переходу лавинного розряду в стримерний є критичне число електронів у лавині

Розрахунки показують, що при кількості електронів $n_{кр} > 10^7 \dots 10^9$ лавина переходить у стример

Для накопичення такої кількості електронів лавина повинна пройти визначену критичну відстань $X_{кр}$. Зі збільшенням відстані між електродами понад $X_{кр}$ лавина неминуче перейде в стримерну форму розвитку розряду. $X_{кр}$ залежить від тиску газу і його складу

ПИТАННЯ

- Міцність повітря при нормальних умовах 30 кВ/см. Який з проміжків даного розрядника швидше перекриється? Середовище - повітря.



Закон Пашена

- Виконання умови самостійності розряду в однорідному полі означає пробій усього проміжку. Приймаючи $\eta = 0$ і прирівнявши умову самостійності розряду до 1:

$$\gamma(e^{aS}-1)=1, \quad (1)$$

$$1+1/\gamma=e^{aS} \quad (2)$$

- Прологарифмуємо (2) і отримаємо відносно a :

$$a=(\ln(1+1/\gamma))/S. \quad (3)$$

Експериментально встановлено, що:

$$a=A * P * e^{-BP/E}, \quad (4)$$

де P - тиск газу;

E - напруженість ел. поля;

A - коефіцієнт, що залежить від складу газу і визначається за формулою:

$$A= \pi r^2/kT, \quad (5)$$

де r - радіус молекул;

k - постійна Больцмана;

T - температура в К.

B – коефіцієнт, який залежить від енергії іонізації газу:

$$B = A * U_i, \quad (6)$$

де U_i - потенціал іонізації газу.

Враховуючи, що:

$$E = U/S,$$

і прирівнявши (3) і (4):

$$\ln(1 + 1/\gamma) = APS e^{-BPS/U} \quad (7)$$

Перетворивши:

$$e^{BPS/U} = APS / \ln(1 + 1/\gamma). \quad (8)$$

Прологарифмувавши (8):

$$BPS/U = \ln(APS / \ln(1 + 1/\gamma)). \quad (9)$$

- Оскільки нас цікавить напруга, при якій відбудеться пробій, то прирівнявши U до пробивної $U_{пр}$, отримаємо:

$$U_{пр} = BPS / \ln(APS / \ln(1 + 1/\gamma)). \quad (11)$$

- З (11) видно, що при незмінній температурі розрядна напруга в однорідному полі є функцією добутку тиску P на відстань між електродами S , тобто:

$$U_{пр} = f(PS). \quad (12)$$

Вираз (12) називається законом Пашена. Графічно ця закономірність представлена на рисунку 4.

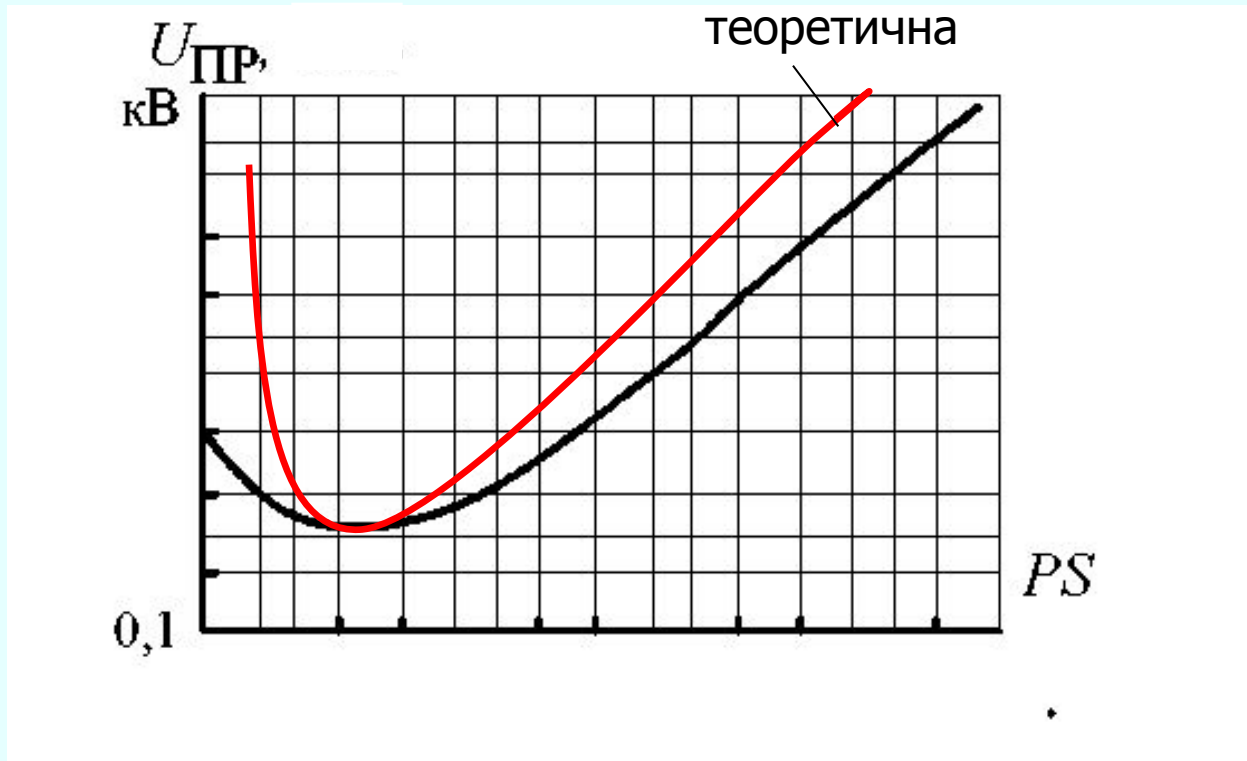


Рисунок 4 - Графічне відображення закону Пашена для повітря

- При $S=const$ збільшення тиску більше значення, що відповідає мінімумові, приводить до збільшення числа зіткнень електронів з нейтральними атомами і молекулами і, як наслідок, до зменшення енергії, яку накопичують вони на довжині вільного пробігу. Отже, для виникнення ударної іонізації необхідно збільшити напругу U .

- З іншого боку, при тиску меншому мінімального, збільшується довжина вільного пробігу і накопичувана електронем енергія, але зменшується кількість зіткнень, що зменшує ймовірність ударної іонізації. Для її збільшення необхідно, щоб як можна більше число зіткнень закінчувалося іонізацією. Для цього необхідно збільшувати енергію e на довжині вільного пробігу, тобто збільшувати U .

- Закон Пашена у виді (11) справедливий при нормальній температурі. Зміна температури діє обернено зміні тиску і повинна враховуватися при розрахунках. В загальному виді з врахуванням зміни температури закон Пашена запишеться:

$$U_{пр} = f(P/S/T).$$

або

$$U_{пр} = f(\delta S),$$

де $\delta = T_0 P / T P_0$

- Тиск P_0 і температура T_0 – умовно прийняті за нормальні ($P_0 = 760$ мм.рт.ст. = $101 \cdot 10^3$ Па, $T_0 = 293$ К = 20 °С),
 - P і T – дійсні на даний час параметри газу.
- При нормальних умовах $\delta = 1$, ($P = P_0$, $T = T_0$).
- Аналогічно: $\delta = 2.93 \cdot 10^{-3} P/T$, (p – Па, T – К).

Тоді:

$$U_{пр д} = U_{пр р} \cdot \delta ,$$

де $U_{пр д}$ — пробивна напруга, приведена до діючих умов виміру;
 $U_{пр р}$ — пробивна напруга, отримана при розрахунку по формулі Пашена.

- Експериментальна крива Пашена відрізняється від розрахункової в областях дуже малих і дуже великих значень PS . В області дуже малих значень PS відмінність пояснюється наближенням до вакуумного пробою, при якому основну роль грають процеси на поверхні електродів, а не в об'ємі газу. При великих значеннях PS відмінність пояснюється збільшенням напруженості електричного поля на мікровиступах електродів і збільшенням ймовірності виникнення лавин, що знижує $U_{пр}$.
- На підставі закону Пашена можуть бути запропоновані способи підвищення пробивної напруги газів:
 - - збільшення тиску більше атмосферного;
 - - зменшення тиску аж до вакууму;
 - - зміна відстані між електродами.

Розряд у неоднорідних полях

У неоднорідному полі на відміну від однорідного E в різних точках проміжку різна по величині або по напрямку. До типових проміжків з неоднорідним полем відносяться: стержень - стержень, стержень - площина, провід - земля.

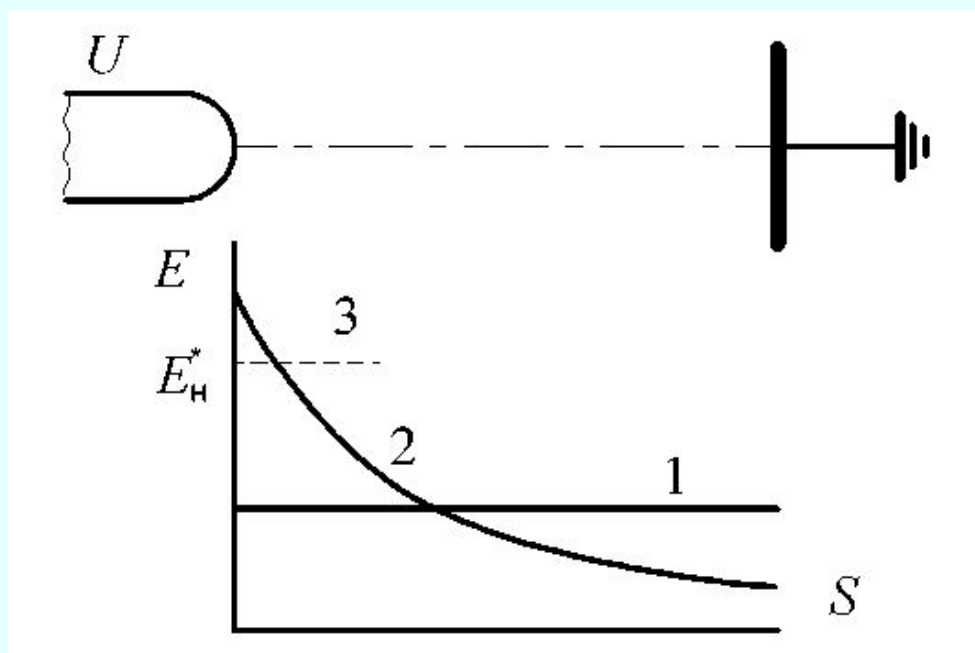


Рисунок 5 - Залежність напруженості електричного поля від відстані між електродами типу стержень-площина: 1 — середня $E = f(S)$; 2 — результуюча в неоднорідному полі $E = f(S)$; 3 — E_n^* — напруженість виникнення самостійної форми розряду

- При деякій початковій напрузі U_n у проміжку виникає самостійний розряд у лавинній формі, тому що поблизу стержня є область з E , що перевищує значення E^*_n , яке відповідає значенню виникнення самостійної форми розряду (рисунок 5). Розряд локалізується в цій області, а вторинні лавини підтримуються або за рахунок фотоіонізації з обсягу газу (при позитивній полярності стержня), або за рахунок фотоемісії з катода (при негативній полярності стержня). Такий розряд називається **коронним розрядом у лавинній формі**.

- Значення напруги і E на електроді при виникненні коронного розряду залежить від ступеня неоднорідності поля (зі збільшенням ступеня неоднорідності напруженість на електроді-стержні збільшується, а напруга виникнення корони зменшується).

- При збільшенні напруги понад U_n , коли кількість e у лавині зростає до 10^7 — 10^9 , вона переходить у плазмовий стан і в проміжку виникає стример біля електроду з підвищеною E .

- Якщо в однорідному полі стример перетинає весь міжелектродний проміжок, то в різконеоднорідному полі в залежності від величини напруги стример, пройшовши певну відстань, може зупинитися. При цьому плазма його розпадається, але поблизу стержня виникають нові стримери, які також зупиняються і їх плазма розпадається.

- Такий стан розряду стійкий, бо при цьому виконується умова самостійності розряду. Явище, коли стримери не досягають протилежного електрода, одержав назву коронного розряду в стримерній формі.
- Для пробою всього міжелектродного проміжку необхідно ще збільшити напругу. Тоді утвориться канал, який просувається від стержня до протилежного електрода. При перетині іскровим каналом всього проміжку він перетвориться в **електричну дугу**, що означає завершення пробою.
- У різконеоднорідних полях напруга пробою завжди більше напруги виникнення коронного розряду в будь-якій формі.

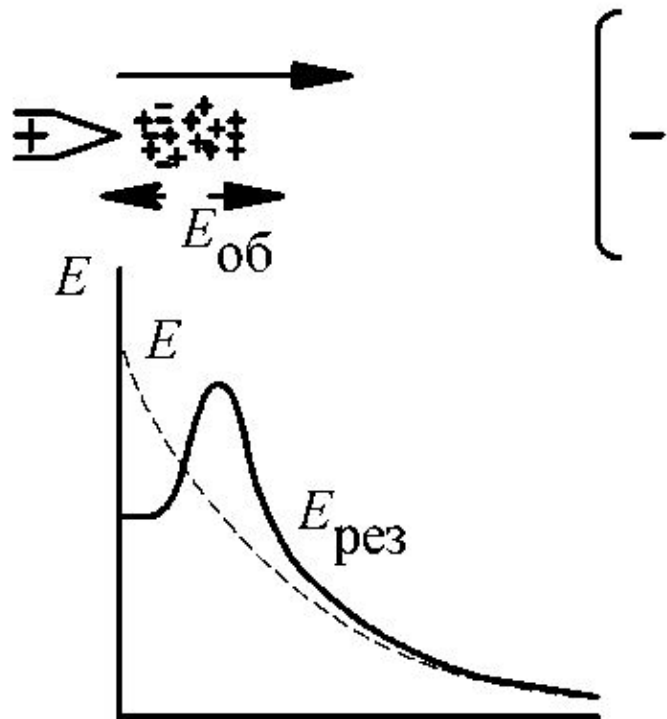
Ефект полярності

- У слабонеоднорідних полях, коронна і розрядна напруги практично співпадають.

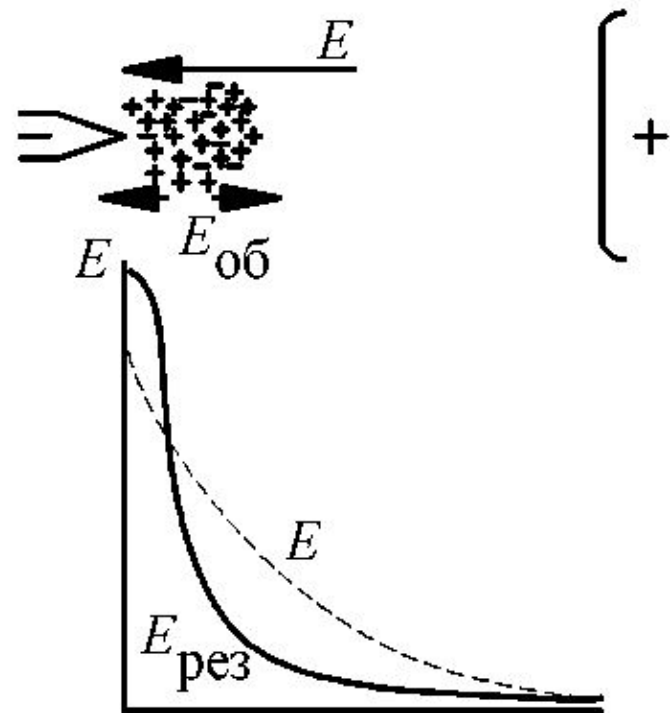
- При несиметричних електродах на величину розрядної напруги істотно впливає полярність прикладеної напруги.

- Так у проміжку стержень-площина формування розряду залежить від полярності стержня.

- При позитивній полярності стержня, наявні у проміжку **e**, рухаючись до стержня в область сильного поля, здійснюють ударну іонізацію і утворюють лавину **e**. Коли лавина доходить до стержня, **e** лавини нейтралізуються на аноді, а позитивні іони внаслідок малої швидкості руху залишаються біля стержня і утворюють позитивний об'ємний заряд, який володіє власним електричним полем.
- Взаємодіючи з зовнішнім полем у проміжку, позитивний об'ємний заряд послаблює поле біля стержня і підсилює його в іншій частині проміжку (рис. 6 а).
- Якщо U між електродами достатньо велика, то виникає лавина електронів праворуч від об'ємного заряду, електрони якої, змішуючись з позитивними іонами об'ємного заряду, створюють зародок каналу анодного стримера, заповненого плазмою. Запалюється стримерний коронний розряд. Позитивні заряди цієї лавини будуть розташовуватися в голові стримера і створювати область підвищеної напруженості в зовнішньому просторі. Наявність області сильного поля забезпечує утворення нових лавин, **e** яких втягуються в канал стримера, поступово подовжуючи його. Стример проростає до катода, викликаючи пробій проміжку при порівняно малій величині розрядної напруги.



а)



б)

Рисунок 6 - Утворення анодного а) катодного б) стримера: E — напруженість зовнішнього поля; $E_{об}$ — напруженість поля об'ємного позитивного заряду; $E_{рез}$ — результуюча напруженість у проміжку після іонізації.

- При негативній полярності стержня електричне поле біля стержня викликає емісію e з катода, які відразу попадають у сильне поле і чинять ударну іонізацію, утворюючи велику кількість лавин. Електрони лавин, переміщуючись в слабке поле біля аноду, втрачають швидкість, захоплюються нейтральними молекулами і стають негативними іонами, розсіяними в просторі. Позитивні іони лавин утворюють об'ємний заряд біля стержня, який взаємодіючи з зовнішнім полем, буде збільшувати E біля стержня і зменшувати в іншій частині проміжку (рис 6, б).

- Зменшення E приводить до того, що для подальшої іонізації в цій частині проміжку необхідно значно збільшити U між електродами.

У силу розглянутих вище особливостей розвиток стримера при негативному стержні відбувається з великими труднощами, при цьому розрядна напруга при негативній полярності стержня більше, ніж при позитивній полярності (у 2–2,5 рази).

- На змінній напрузі пробій відбувається завжди на позитивній полярності.

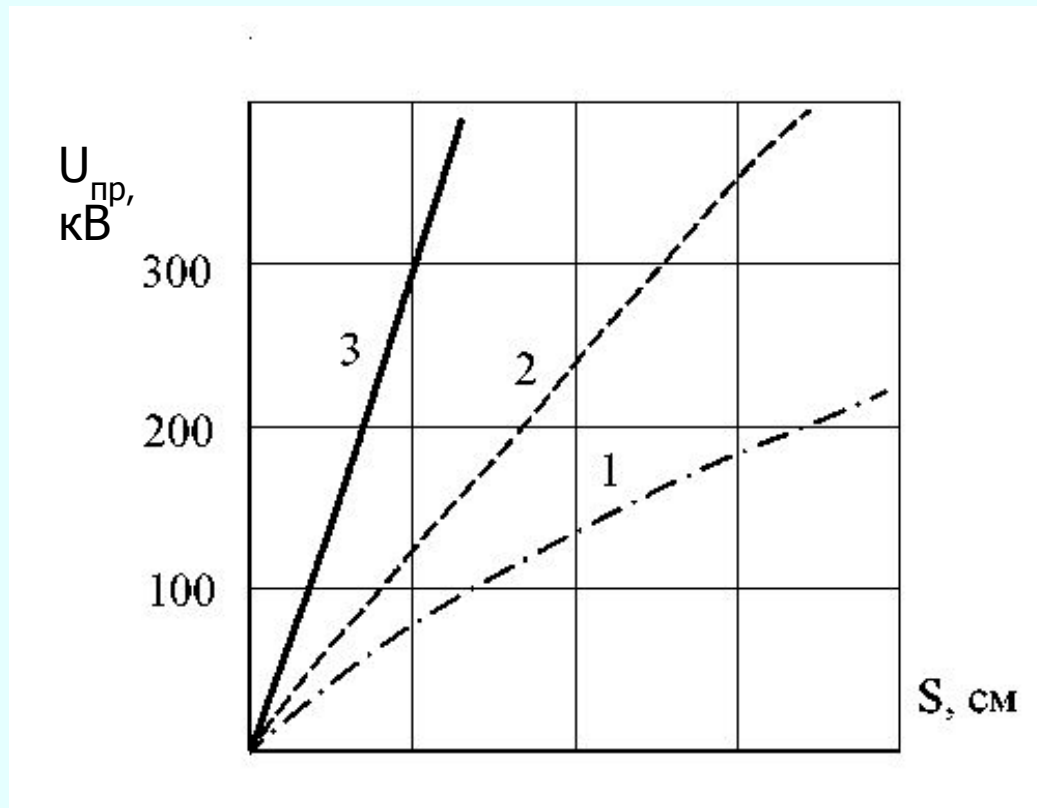


Рисунок 7 - Залежність пробивної напруги від відстані між електродами стержень-площина на імпульсній напрузі: 1 — позитивна полярність вістря; 2 — негативна полярність вістря; 3 — однорідне поле

Бар'єрний ефект

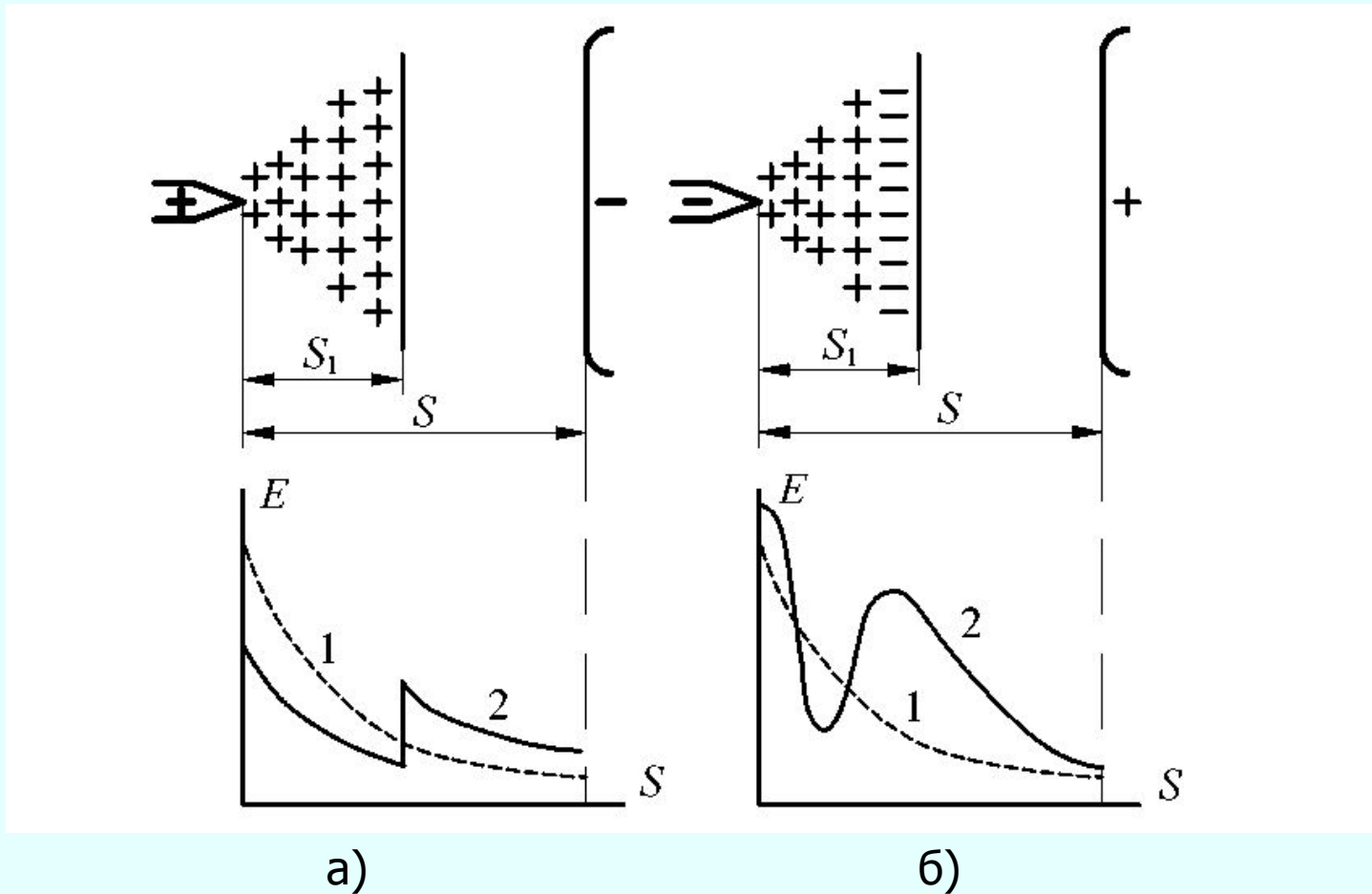
- Істотний вплив об'ємного заряду на розвиток розряду в повітряному проміжку з різконерівномірним полем використовується на практиці для збільшення розрядних напруг ізоляційних проміжків.

- Це збільшення досягається за рахунок розміщення у проміжках бар'єрів із твердого діелектрика (електрокартон, гетинакс і ін.).(+,-).

- При позитивному стержні позитивні іони осідають на бар'єр і розтікаються по його поверхні тим рівномірніше, чим далі від стержня розташований бар'єр. Це приводить до більш рівномірного розподілу напруженості в проміжку між бар'єром і площиною (рис.8, а) і, відповідно, до значного збільшення розрядної напруги.

- При негативній полярності стержня електрони, рухаючись від вістря, попадають на бар'єр, втрачають швидкість і більшість з них разом з атомами кисню стають негативними іонами. На бар'єрі в цьому випадку з'являється зконцентрований негативний заряд, що збільшує E не тільки між позитивним об'ємним зарядом біля стержня і бар'єру, але і в зовнішньому просторі.

- при негативній полярності стержня збільшення розрядної напруги в проміжку за наявності бар'єра буде незначним.



- Рисунок 8 - Розподіл напруженості поля в міжелектродному газ. проміжку при наявності бар'єра: а) — позитивна полярність стержня; б) — негативна полярність стержня; 1 — розподіл напруженості поля без бар'єра; 2 — розподіл напруженості поля з бар'єром

Розміщення бар'єру в проміжку

При розміщенні бар'єру в середині проміжку розрядні напруги при негативній і позитивній полярностях близькі.

При розміщенні бар'єру біля позитивного стержня роль його зменшується внаслідок різкої нерівномірності розподілу зарядів на бар'єрі. Напруженість поля є достатньою для того, щоб іонізаційні процеси проходили і на іншу сторону бар'єра.

Бар'єр, розміщений біля негативного стержня, не здатний затримувати швидкі електрони з стержня, які проходять крізь нього до площини.

■ Бар'єри в проміжку встановлюються на такій оптимальній відстані від стержня, на якій розрядні U максимальні (25-30 % від довжини проміжку між електродами), причому при позитивній полярності стержня розрядна U може збільшитися в 2 рази в порівнянні з проміжком без бар'єру (рис. 9).

■ Бар'єри широко використовуються у високовольтних конструкціях, які працюють як у повітрі, так і в маслі (високовольтні вводи, трансформатори й ін.). За рахунок цього при змінній напрузі електрична міцність на позитивній полярності збільшується і наближається до електричної міцності на негативній полярності.

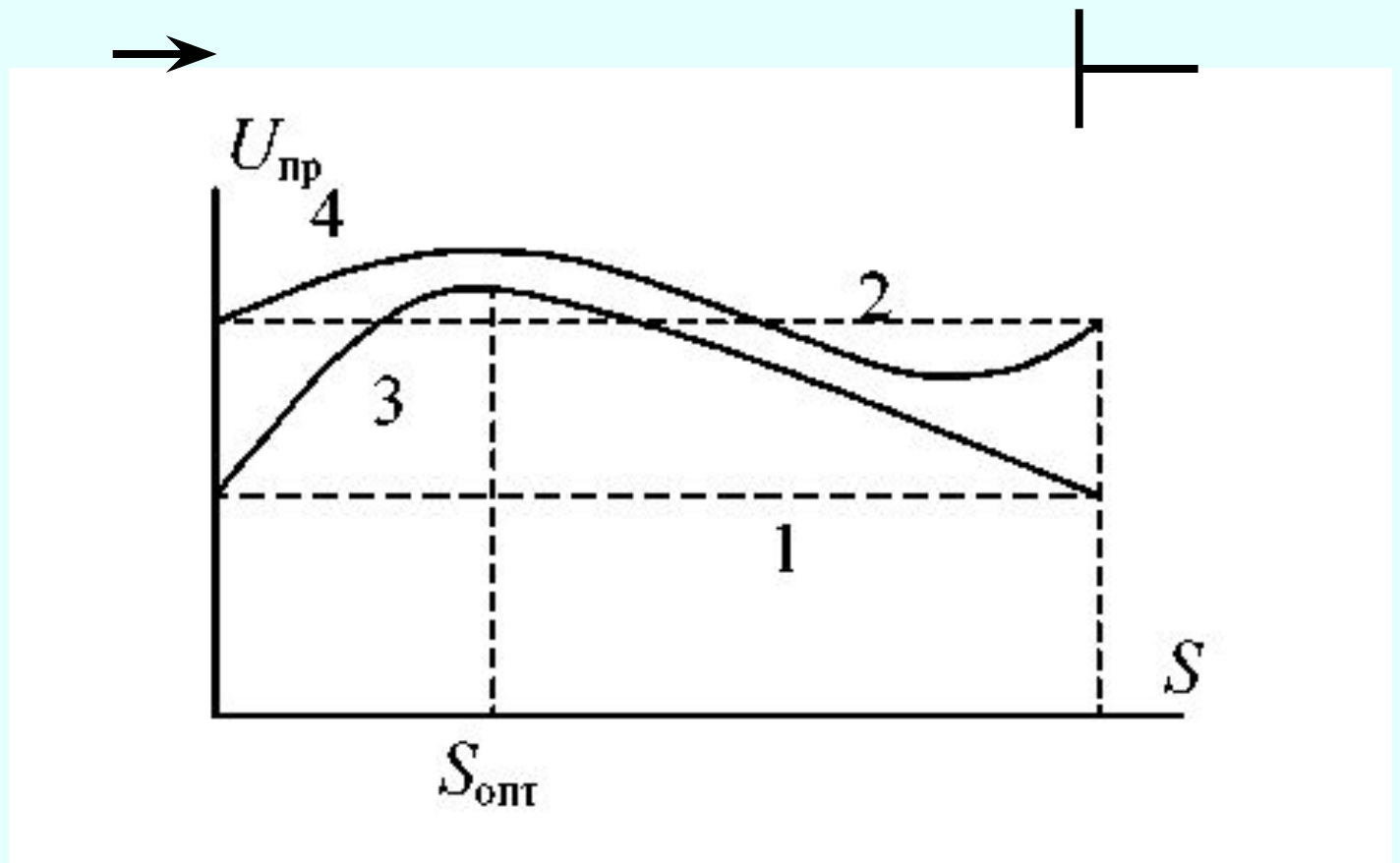


Рисунок 9 - Вплив бар'єра на пробивну напругу газового проміжку при позитивній (1, 3) і негативній (2, 4) полярностях напруги: 1, 2 — пробивна напруга проміжку без бар'єра; 3, 4 — пробивна напруга проміжку з бар'єром

Дуговий розряд (самостійно)

- В електроустановках при комутації робочих струмів розмикання контактів супроводжується виникненням дуги – розряду з великою густиною струму (до 100 кА/см^2). Дугові розряди виникають і при поверхневих розрядах – перекриття ізоляції електроустаткування по поверхні.

У дузі є три характерних ділянки: прикатодна, стовп дуги, прианодна.

Довжина прикатодної ділянки – порядку довжини вільного пробігу електрона $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ см}$., довжина прианодної ділянки – приблизно така ж. Величина напруги у прикатодній ділянці U_k приблизно відповідає напрузі іонізації газу, в якому горить дуга: $U_k \sim 8 \div 12 \text{ В}$, – залежно від матеріалу катода; $U_a \sim 1 \div 2 \text{ В}$. Падіння напруги на стовпі дуги:

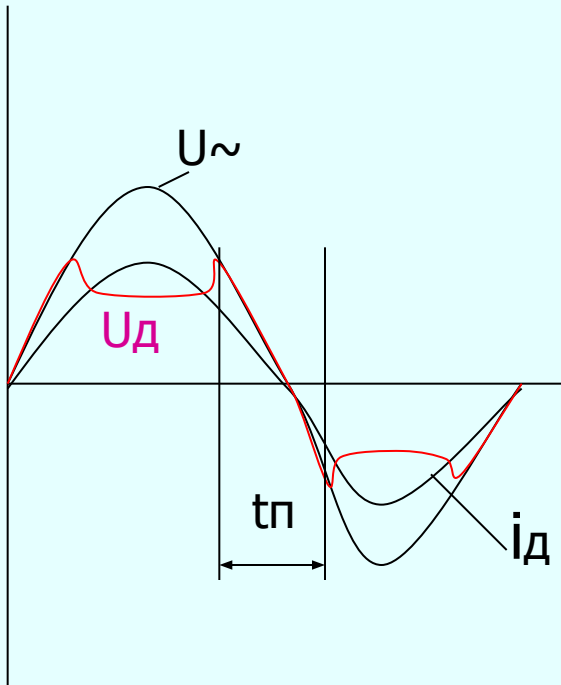
$$U_c = E_s \cdot L_c,$$

а напруженість в каналі розряду: $E_s \sim 15 \div 25 \text{ В/см}$,
де L_c – довжина стовпа дуги, см.

Нерівності поверхні катода збільшують напруженість електричного поля у стовпі дуги. При значній густині струму дуги температура поверхні катода досягає температури випаровування металу катода й енергія електронів стає настільки великою, що дозволяє їм вийти з катода, тобто відбувається термоелектронна емісія. Стовп дуги являє собою сильно іонізований об'єм газу, що складається з позитивних та негативних іонів і називається плазмою, яка характеризується дуже високою температурою - від 5000 до 25000 К.

- Горіння дугового розряду є вкрай негативним явищем, оскільки пов'язано з великими втратами електроенергії і можливим руйнуванням металевих частин електрообладнання.

Гасіння дуги



При переході змінної U через 0 виникають паузи струму, які є сприятливими для гасіння дуги.

Для того, щоб після проходження струму дуги через 0 не пройшло повторне запалювання дуги необхідно, щоб до цього часу канал дуги мав достатню ел. міцність, тобто $U_{пр}$ каналу дуги повинна перевищувати величину відновлювальної напруги проміжку

Для цього на практиці застосовують:

- видалення іонізованих часток шляхом дуття;
- тиск (для пришвидшення процесів деіонізації);
- вентильні розрядники (дуга розбивається на певну кількість маленьких дуг)

ЕЛЕГАЗ

(див. стенд)

Коронний розряд на проводах ЛЕП

- **Коронний розряд** - це самостійний розряд, при якому ударна іонізація електронами має місце не на всій довжині проміжку, а лише біля електродів.
- Коронний розряд має лавинну і стримерну форми.
- **Корона на проводах ЛЕП супроводжується втратами енергії.** Наприклад, на лініях високої напруги втрати енергії при коронуванні проводів ЛЕП можуть досягати у погану погоду - **100-200 кВт на кілометр** лінії.
- **Продукти іонізації повітря руйнують ізоляцію і металеву арматуру.**
- **Коронний розряд є джерелом акустичного шуму і високочастотного електромагнітного випромінювання.**

Розвиток корони на ЛЕП при змінній U

- На змінній напрузі коронний розряд запалюється при досягненні початкової напруги U_n рівній напрузі запалювання корони при t_1 (рис.10, а).

- Навколо проводу утворюється зона іонізації, яка наз. чохлом корони (рис.10, в). З чохла корони позитивні заряди виносяться в навколишній простір і утворюють зовнішній об'ємний заряд (ОЗ). Процес коронування продовжується доти, поки напруга не досягне U_{\max} при t_2 .

- Незважаючи на підвищення напруги до U_{\max} , E на проводі залишається постійною через вплив ОЗ. Потім напруга починає знижуватися. Синхронно знижується і напруженість на проводі, що приводить до згасання корони.

- Але після згасання корони (після t_2) у просторі навколо проводу залишається позитивний зовнішній об'ємний заряд, який ще віддаляється від проводу.

- Відстань, на яку віддаляється цей ОЗ, залежить від напруги на проводі і складає $\sim 40-100$ см.

- Різниця потенціалів між проводом і ОЗ збільшується в міру зменшення E на проводі до часу t_3 .
- При t_4 , коли напруга досягає U_0 , що значно менше U_n , запалюється негативна корона. При цьому негативно заряджені частки починають рухатися від проводу в зовнішню область, а назустріч (до проводу) рухаються позитивно заряджені частинки з зовнішнього об'ємного заряду. Відбувається рекомбінація заряджених часток до повної компенсації позитивного зовнішнього ОЗ.
- Потім накопичується **негативний ОЗ** у зовнішній області. Все це відбувається за час від t_4 до t_5 . У момент часу t_5 негативна корона гасне.
- **Надалі усі ці цикли повторюються і запалювання корони на обох полярностях відбувається при U_0 .**

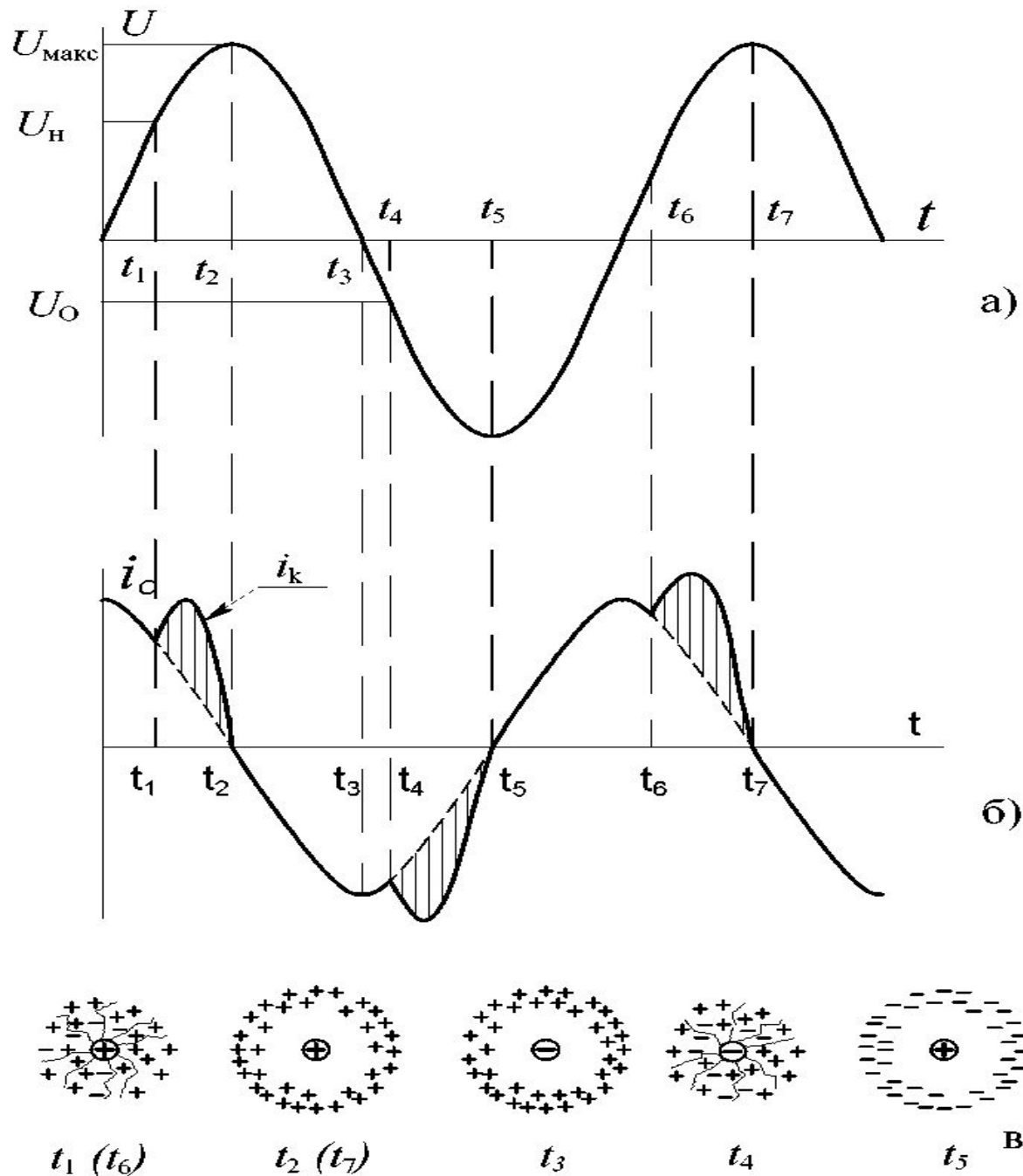


Рисунок 10 - Розвиток корони при змінній напрузі

- Між проводом і землею має місце **ємність C** , яка заряджається і розряджається з частотою змінного струму. При цьому між проводом і землею протікає ємнісний струм i_0 .

- Виникнення коронного розряду в момент t_1 приводить до появи струму корони i_k , що накладається на ємнісний струм лінії і спотворює синусоїду струму. Тривалість піків струму корони дорівнює тривалості її горіння, тобто від t_1 до t_2 та t_4-t_5 .

- При змінній напрузі коронування проводів більш інтенсивне, чим при постійній напрузі, і за інших рівних умов втрати енергії на корону істотно більші.

- На характеристики коронного розряду на ЛЕП (початкова напруга, втрати енергії на корону, радіозавади, шум) значно впливають погодні умови.

- Атмосферні опади різко знижують початкову напругу виникнення корони.

- **Коротко:** При коронному розряді відбувається іонізація повітря і біля поверхні проводу утворюється об'ємний заряд того ж знаку, що і полярність напруги на проводі. Під дією сил електричного поля іони, що утворюють об'ємний заряд, рухаються від проводу. При зміні полярності на проводі – до проводу.

■ Для їхнього переміщення необхідні витрати енергії, які і визначають в основному втрати енергії на корону, оскільки втрати енергії на іонізацію повітря значно менші.

- З коронним розрядом доводиться зустрічатися на лініях електропередачі напругою 110 кВ і вище, а також у високовольтних апаратах, де корона може виникати в газових прошарках у товщі ізоляції та біля гострих країв електродів (в/в електричних машинах).

- На проводах розрізняють місцеву й загальну корону.

■ Поверхня проводів негладка. Крім нерівностей, викликаних дротами верхнього повиву, на поверхні проводу є подряпини, задирки, забруднення. У цих місцях напруженості електричного поля - високі й тут уже при порівняно невисоких напругах виникає **місцева корона**.

■ При більш високих напругах корона охоплює проводи на всій довжині. Ця стадія називається **загальною короною**.

■ Теоретично визначено напруженості й напруги виникнення місцевої корони. Тому при розгляді корони на лініях виходять із характеристик загальної корони.

ВТРАТИ НА КОРОНУ В ПОВІТРЯНИХ ЛЕП

При проектуванні ЛЕП користуються розрахунковими залежностями втрат енергії при коронуванні. Розповсюдженою формулою для розрахунку втрат на корону на змінній напрузі є емпірична формула Піка для одиночного проводу:

$$P = \frac{24,1}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r_0}{S}} (U_\phi - U_k)^2 \cdot 10^{-5}, \text{ кВт/км}\cdot\text{фаза}$$

де δ - відносна щільність повітря;

f - частота, Гц;

r_0 - радіус одиночного проводу, см;

S - відстань між проводами, см;

U_ϕ - діюче значення фазної напруги, кВ;

U_k - напруга виникнення корони, кВ.

Початкову напруженість появи корони обчислюють за формулою:

$$E_{HK} = 24,5 \cdot \delta \cdot m_1 m_2 \left[1 + \frac{0,65}{(r \cdot \delta)^{0,38}} \right],$$

а при малих радіусах r проводів використовують формулу Піка:

$$E_{нк} = 30.3 \cdot \delta \cdot m_1 m_2 \left(1 + \frac{0,3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \text{ кВ/см, при } r < 1 \text{ см.}$$

де m_1 – коефіцієнт гладкості проводу;

m_2 – коефіцієнт погоди. (Від 0,5 до 1).

Для ідеально гладкого проводу $m_1 = 1$, для реального крученого проводу $m_1 = 0,85-0,95$ (залежить від конфігурації проводу).

- В умовах дощу, снігу, ожеледі корона виникає при меншій напруженості електричного поля. Облік втрат на корону необхідно проводити, якщо робоча напруженість E біля проводу наближається до величини початкової напруженості появи корони:

$$E = \frac{Q}{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r},$$

- де Q – максимальне фазне значення заряду поверхні проводу (Кл/км),

- $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-9}$, Ф/км – діелектрична проникність повітря.

Запишемо заряд Q через діюче значення лінійної (номінальної)

напруги лінії U_L і ємність фази C : $Q = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} C \cdot U_L$, і отримаємо величину

допустимої робочої напруженості E_p , при якій корона відсутня:

$$E_p = 0,0147 \frac{CU_L}{r} \text{ (кВ/см)}$$

Таким чином, якщо $E_p \geq 0,5 \cdot E_{нк}$, то втрати на корону значні і їх необхідно *обмежувати*.

$$U_{\text{к}} = 21,2 \cdot \delta \cdot \ln \frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot r_0, \text{ кВ},$$

де m_1 – коефіцієнт гладкості проводу;
 m_2 – коефіцієнт погоди. (Від 0,5 до 1).

На практиці вважають $\ln(S/r_0) \sim 6.5$.

В гарну погоду втрати на корону повинні бути близькі до 0. Нехай $m_1=1$; $m_2=0,8$; $\delta=1$. Умова відсутності втрат на корону $U_{\text{к}}=U_{\text{ф}}$.

$$U_{\text{ф}} = U_{\text{л}} / \sqrt{3}.$$

Напруга лінії під час експлуатації може перевищувати номінальну не більше 10%:

$$U_{\text{л}} = 1,1 U_{\text{н}}.$$

Тоді для мінімального діаметру $d=2r_0$:

$$d_{\text{min}} = 1.15 \cdot 10^{-2} U_{\text{н}}.$$

U, кВ	110	220	500	750
d, см	1,25	2,5	5,8	8,8

Тобто такі діаметри проводів повинні бути при нормальних умовах за вимогою відсутності корони!!!

При $U_k \geq 330$ кВ необхідно щоб площа поперечного перерізу і діаметр були незалежні.

Ця вимога реалізується в так званих **розширених проводах**, в яких струмопровідні сегменти розташовані по периметру непровідної центральної серцевини.

Застосовують також **розщеплення фаз** – коли кожна фаза лінії складається не з одного, а декількох проводів меншого діаметра (Рис. 11). Це дозволяє при необхідному сумарному перерізі проводів істотно знизити максимальну напруженість поля на їх поверхні.

Розщеплюють: 330 кВ на 2 проводи, 500 кВ на 3 проводи, 750 кВ на 4 проводи

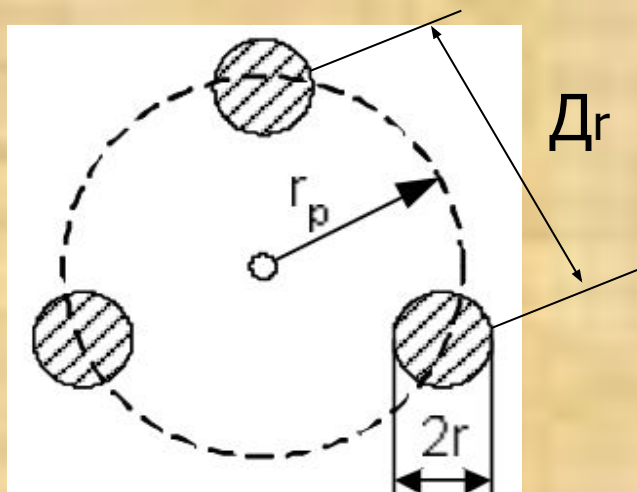


Рисунок 11 – Характеристики розщепленої фази

Середня робоча напруженість електричного поля на поверхні проводів розщепленої фази дорівнюватиме:

$$E_{cp} = \frac{q_1}{(2\pi\epsilon_0 \cdot n \cdot r)} = \frac{U_\phi}{\left(n \cdot r \cdot \ln \frac{L}{r_e} \right)},$$

де L – середньо геометрична відстань між фазами,

$r_e = \sqrt[4]{n \cdot r \cdot r^{n-1}}$ – еквівалентний радіус одиночного проводу, який має

ту ж ємність, що і розщеплена фаза.

Максимальна напруженість на поверхні проводів розщепленої фази:

$$E_{max} = k_y E_{cp} = f(n, r_p), \quad (1)$$

де $k_y = 1 + (n - 1) \frac{r}{r_p}$ - коефіцієнт, що враховує посилення напруженості поля через вплив зарядів на сусідніх проводах розщепленої фази (рис.12).

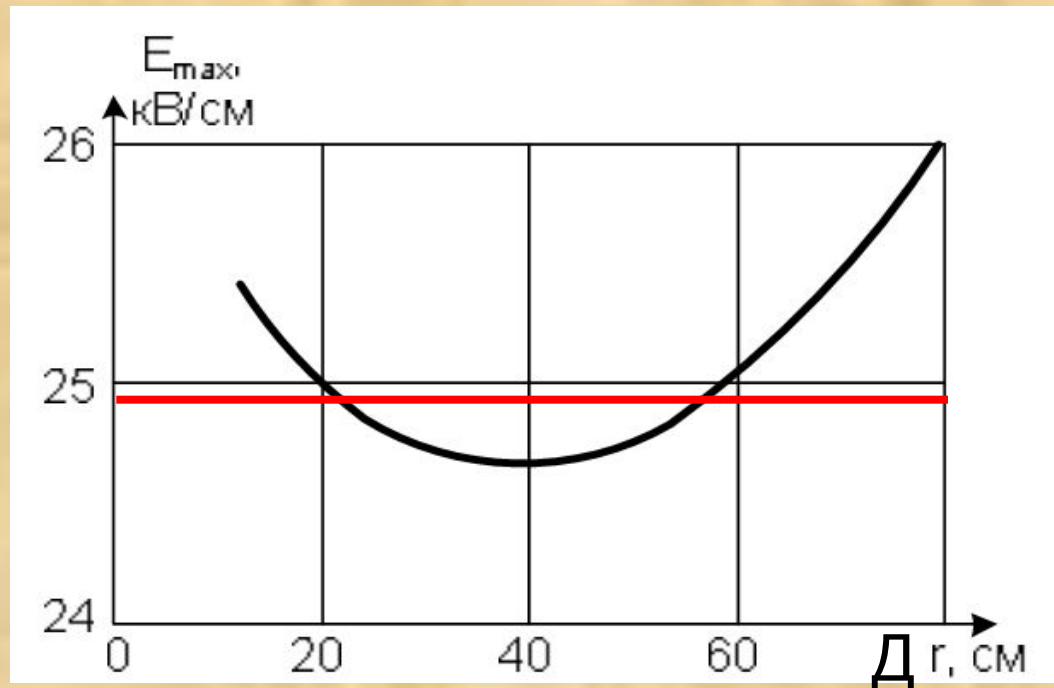


Рисунок 12 – Залежність максимальної напруженості електричного поля розщепленої фази від відстані D_r між проводами ЛЕП-500кВ ($n=3$)

При збільшенні r_p зменшується вплив зарядів сусідніх проводів, але збільшується ємність фази і її заряд. Таким чином, існує оптимальний радіус розщеплення, при якому E_{max} – найменша.

З (1) видно, що мінімальне значення напруженості E_{max} визначається оптимальним радіусом розщеплення r_p і числом одиночних проводів n .

Наявність корони на проводах ЛЕП є **негативним явищем з таких причин:**

- струм коронного розряду – імпульсний зі спектром частот від 0,15 до 1000 МГц, що створює перешкоди у всьому радіо- та теледіапазоні;
- акустичний шум шкідливий для людини і вимагає збільшення зони відчуження ЛЕП (лінія 330 кВ не ближче 300 м до населеного пункту);
- корона супроводжується створенням поблизу проводів ЛЕП і переміщенням до землі об'ємних зарядів, що викликає активні втрати електроенергії, які досягають $\sim 40\%$ втрат від нагріву проводів.

- Радіоперешкоди від корони максимальні на ЛЕП надвисокої напруги в дощ і сніг. Основне джерело радіоперешкод – стримерна корона.

- Допустима напруженість радіоперешкод нормується на частоті 1 МГц

- і в хорошу погоду не повинна перевищувати 50 мкВ/м на відстані 50м від ЛЕП 330 – 750 кВ.

- Однак збільшенням діаметру проводів і зниженням напруженості поля на їхній поверхні неможливо виключити корону при несприятливих атмосферних умовах. В місцях пошкодження проводів і арматури гірлянд (на елементах кріплення, тобто в зонах місцевого посилення поля) навіть при нормальних умовах може виникнути місцева корона.

Більш надійні результати виходять при використанні даних вимірів, отриманих і за кордоном безпосередньо на лініях при різних умовах погоди. Втрати на корону залежать головним чином від співвідношення робочої й початкової напруженості $\frac{E}{E_0}$ і умов погоди.

Отримані дослідні дані втрат можна узагальнити для різних марок одиночних, а також для розщеплених проводів у вигляді залежностей

$$\frac{P_k}{n^2 r_0^2} = F\left(\frac{E}{E_0}\right), \quad (1.38)$$

де P_k - втрати потужності на корону на розглянутій фазі, кВт/км;

r_0 - радіус проводу, см;

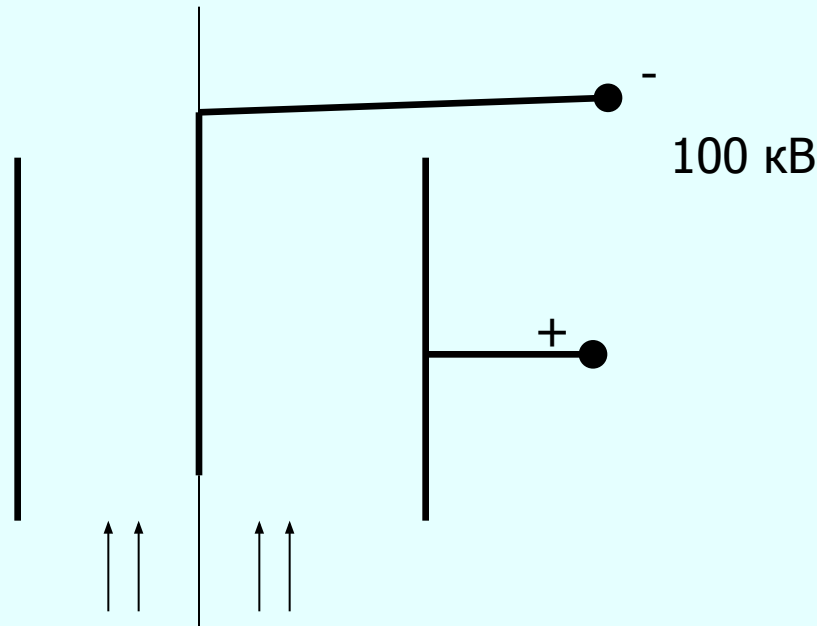
E - робоча напруженість електричного поля, кВ/см;

E_0 - початкова напруженість електричного поля при $\delta=1$;

n - число проводів у фазі при розщепленні.

Далі дивись Ст. 74-78 (ТВН – гай, кулик)

- **Практичне застосування коронного розряду (ст. 80-90)**
- Для очистки газів від домішок



- Для фарбування в електростатичному полі: лак або фарба розпиляється в ел. полі коронуючого розряду (-) полярності. Від'ємні частинки розпиленої фарби заряджаються і осідають на виробі, що фарбується. Виріб являється анодом.

Розряди в повітрі при імпульсних напругах

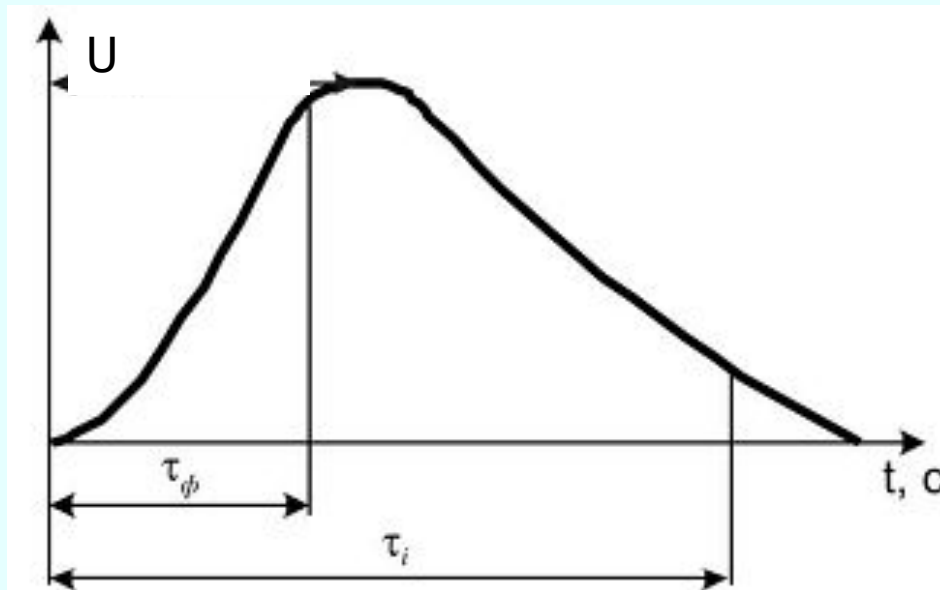
- Поширюючись уздовж ліній, імпульсні хвилі впливають на лінійну ізоляцію й ізоляцію електроустаткування електричних станцій і підстанцій. У зв'язку із цим високовольтне електроустаткування повинне мати певну імпульсну міцність, тобто мати певні розрядні характеристики при імпульсних впливах.
- Величини імпульсних напруг, які електроустаткування повинно витримувати **без виникнення розрядів** (випробувальні напруги), установлюються відповідно до величин можливих імпульсних впливів **з урахуванням дії захисних апаратів** (розрядників).
- Для трансформаторів, апаратів і ізоляторів високої напруги імпульсні випробувальні напруги зафіксовано в нормативних документах.

Імпульсна хвиля характеризується:

- амплітуда;

- тривалість фронту імпульсу: $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,36$ мкс.

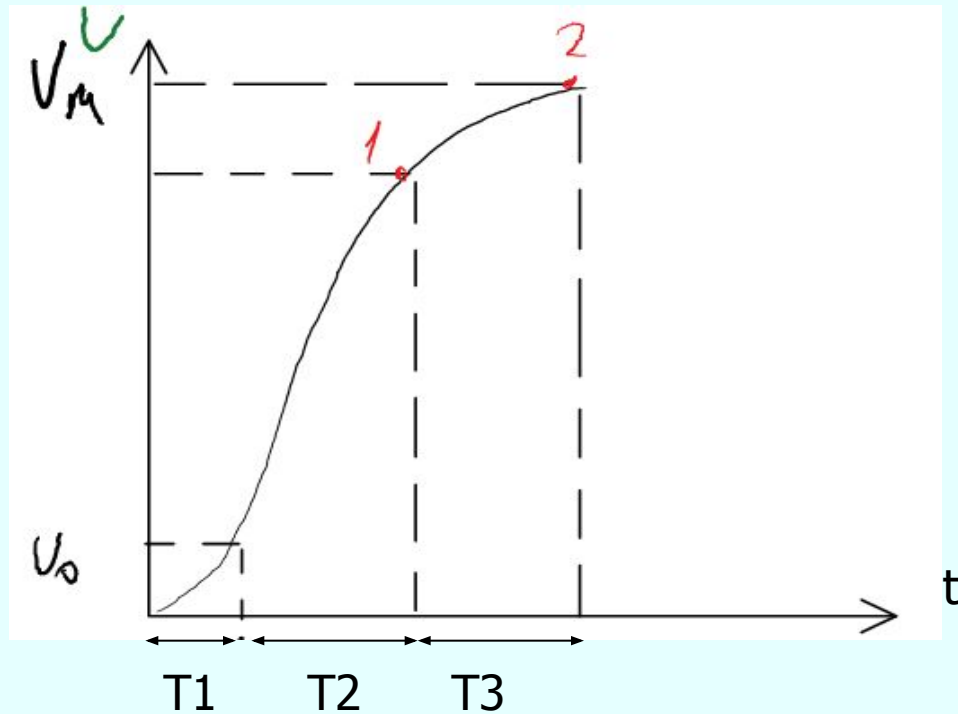
- тривалість самого імпульсу: $\tau_i = 50 \pm 10$ мкс.;



В залежності від часу дії імпульси поділяються:

нано, мікро і мілісекундного діапазонів

- Мікро- характерні для атмосферних перенапруг,
- Мілі – для комутаційних,
- Нано – для деяких режимів атмосферних.



T1 - час який відповідає виникненню самостійного розряду;
T2 - час початку виникнення вільних електронів (час появи першого ефективного електрона - статистичний час запізнення);
T3 - час формування розряду.

Час запізнення розряду дорівнює часу появи запального електрону плюс час формування лавини. Так як поява запального електрона носить статистичний характер то статистичним буде й характер розподілу розрядних напруг. Розряд починається в точці 1 а закінчується в точці 2.

- В якості кількісної характеристики імпульсної розрядної напруги використовується 50% розрядна напруга – це напруга, при якій розряд відбувається в 50% випадків при прикладанні однієї і тієї ж хвилі.
- Відношення пробивної імпульсної напруги до пробивної напруги при тривалому впливі (статичної пробивної напруги) називається коефіцієнтом імпульсу:

$$\beta = \frac{U_{имп}}{U_c}$$

- Розрядна напруга проміжку при імпульсних напругах залежить від часу появи запального електрону в проміжку.

Вольт-секундна характеристика

- Більш повно, ніж коефіцієнт імпульсу, характеризують поведінку ізоляційних проміжків при імпульсах **вольт-секундні характеристики**.

Вони встановлюють залежність між амплітудою імпульсу й повним часом розряду t_p - часом від моменту прикладання напруги до завершення розряду.

Для одержання вольт-секундної характеристики необхідно випробовуваний об'єкт піддати впливу стандартних імпульсних хвиль різної амплітуди. Залежно від величини амплітуди імпульсу розряд буде відбуватися при різних t_p .

За допомогою електронного осцилографа можна зафіксувати форму й амплітуду імпульсної хвилі й час розряду в кожному випадку.

На підставі цих даних будують вольт-секундну характеристику.

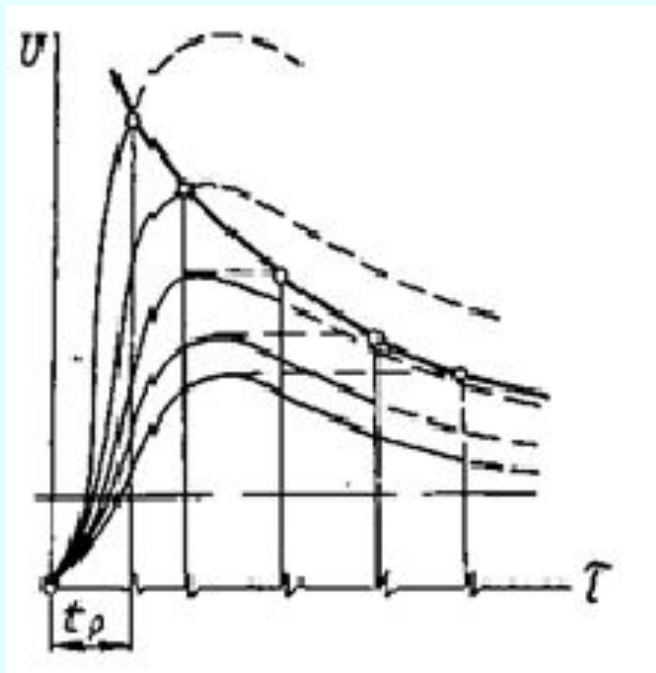


Рисунок 1 - Побудова вольт-секундної характеристики: t_p - час розряду

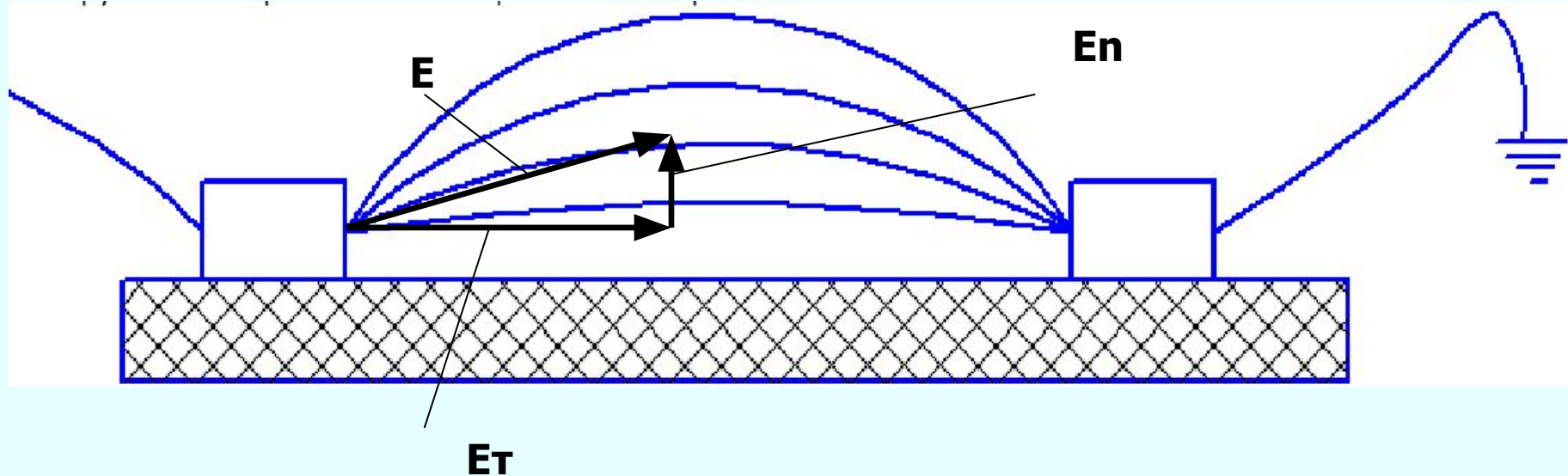
Якщо розряд відбувається на хвості хвилі, то точки вольт-секундної характеристики зв'язують час розряду й амплітуду імпульсу. Якщо розряд відбувається на фронті хвилі, то ці точки зв'язують час розряду з напругою імпульсу в момент розряду.

- Вольт-секундні характеристики мають спадаючий характер: зі зменшенням амплітуди імпульсу збільшується час розряду.
- Вольт-секундні характеристики мають істотне значення при захисті електроустаткування від впливу набігаючих імпульсних хвиль за допомогою захисних розрядників.
- Характеристики захисних розрядників повинні лежати нижче характеристик ізоляції, що захищається.

Розряд у повітрі по поверхні твердого діелектрика

- Електрична міцність при розташуванні електродів на поверхні твердого діелектрика залежить від того яка складова напруженості переважає тангенціальна або нормальна.

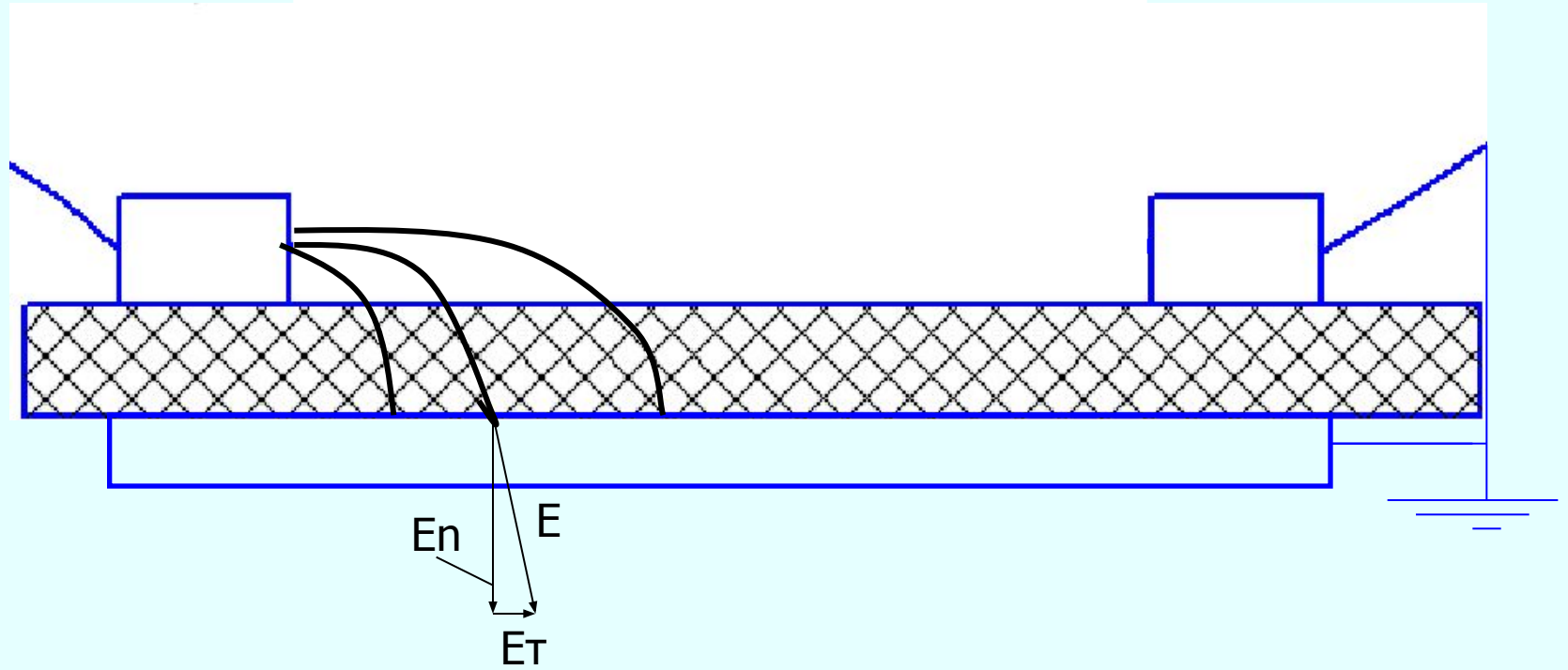
1) $E_T \gg E_n$



У випадку коли електроди розміщені на поверхні діелектрика при $E_t > E_n$ розрядні напруги близькі до розрядних напруг чисто повітряного проміжку, але існують причини внаслідок яких розрядна напруга в повітрі більше розрядної напруги по поверхні діелектрика:

1. Викривлення поля біля електродів за рахунок поляризованої в електричному полі вологи;
2. Не щільне прилягання електроду до діелектрика.

- 2) $E_T \ll E_n$



У випадку, коли переважає значна нормальна складова напруженості електричного поля - розрядні напруги різко зменшуються. Фізично це пояснюється тим, що заряджені частинки притискаються нормальною складовою до поверхні діелектрика. При цьому відбувається бомбардування її і за рахунок емісії кількість електронів у проміжку збільшується, що призводить до послаблення його ізоляційних властивостей.

Між електродами існує поверхнева ємність яка дорівнює

$$C_{\text{п}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \quad \text{Якщо ємність привести до питомої поверхневої ємності, то:}$$
$$C_{\text{пит.}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{dS} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{d}$$

де S – площа, d – товщина діелектрика.

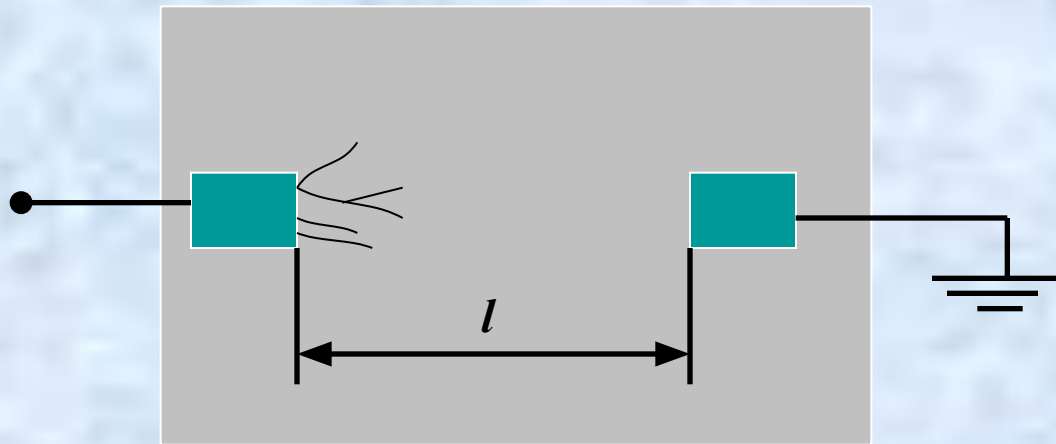
Питома поверхнева ємність – це ємність одиниці поверхні, по якій розвивається розряд по відношенню до протилежного електрода.

При переважаючій нормальній складовій напруженості від електроду з потенціалом по поверхні твердого діелектрика починає розвиватись ковзний розряд. Напруга виникнення ковзного розряду

$$U_{\text{к.р.}} = \frac{\text{const}}{C_{\text{п}}^{0,44}}$$

де const – коефіцієнт, який визначається дослідним шляхом.

Довжина каналу ковзного розряду залежить від його провідності, а отже і від значення струму в ньому. В свою чергу струм залежить від напруги між електродами і ємності каналу стримера відносно протилежного електрода. Вплив цих параметрів врахований в емпіричній формулі Теплера згідно якої довжина ковзного розряду:



$$l_k = \text{const } C_n^2 U^2 \sqrt{\frac{dU}{dt}}$$

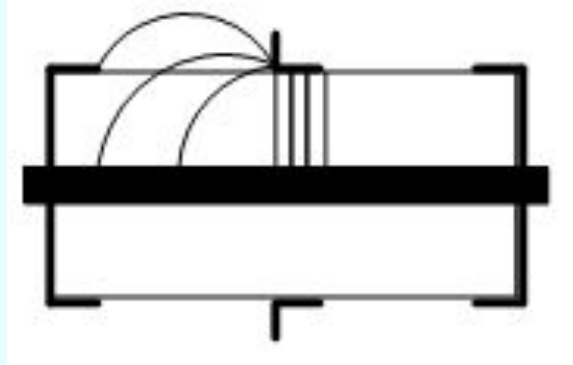
При підстановці $l_k = l$ можна визначити значення U_p для перекриття ізолятора:

$$U_p = l^{1/5} C^{-1/5} \left(\frac{dU}{dt} \right)^{-20} \text{Const}^{-1/5}$$

$$U_p = l^{0,2} \left(\frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{0,4} \text{Const}$$

(*)

- З останньої формули виходить, що **збільшення довжини ізолятора дає відносно мале підвищення напруги розряду**, тому для збільшення напруги розряду прохідних ізоляторів зменшують питому поверхневу ємність шляхом збільшення діаметру ізолятору біля фланця з якого можна очікувати розвиток розряду. Також використовується біля фланця напівпровідне покриття яке сприяє вирівнюванню розподілу напруги по поверхні ізолятора.



- Розряд по лінії розділу напруженості твердого діелектрика та іншим видом (повітря-фарфор, масло-папір) називається **поверхневим (КОВЗНИМ)** розрядом. Ковзний розряд поблизу поверхні розвивається без істотної взаємодії з нею, тому вид ізоляції мало впливає на величину розрядної напруги. Для збільшення розрядної напруги ізолятора застосовують малогігроскопічні діелектрики, наприклад, глазурований фарфор. Для запобігання утворення мікрозазорів між діелектриком і електродом використовують еластичні мастики.