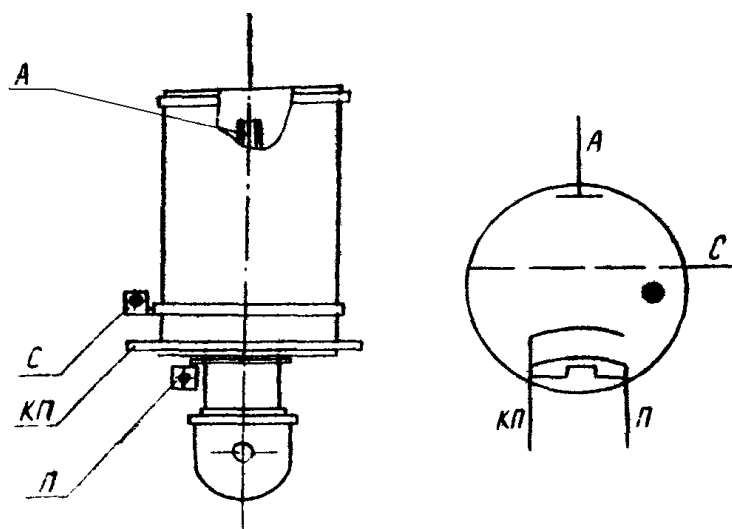


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ КАФЕДРА КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

ШУАІБОВ О.К., ШЕВЕРА І. В., КАЧЕР І.Е.

“РОБОЧИ ЕЛЕМЕНТИ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ
СИЛЬНОСТРУМОВОЇ ІМПУЛЬСНОЇ
ЕЛЕКТРОНІКИ”

Навчальний посібник з спецкурсу “Основи імпульсної техніки”
для студентів IV курсу спеціалізації “квантова електроніка.”



Ужгород - 2005

УДК 621.374(075) + 631.142.6

Робочі елементи високовольтної сильнотрумової імпульсної електроніки. Навчальний посібник // О. К. Шуаїбов. - Ужгород, УжНУ, фізичний факультет, кафедра квантової електроніки 2005. -56 с.

Навчальний посібник написано у відповідності до програми спецкурсу “Основи імпульсної техніки”, що вивчається студентами четвертого курсу фізичного факультету, які спеціалізуються на кафедрі квантової електроніки. Він надає інформацію про роль і місце високовольтної імпульсної техніки в сучасних імпульсних пристроях, основні характеристики та механізми роботи елементів високовольтної електроніки (резистори, конденсатори, тиратрони, газові розрядники тощо). Матеріал цього посібника може бути використаний студентами для поглибленого засвоєння лекційного курсу з навчальної дисципліни “Основи імпульсної техніки”, також при вивченні квантової електроніки, оскільки робота блоків живлення лазерів побудована на основі елементів високовольтної імпульсної електроніки.

Іл. 30; табл. 5.; Бібл.: 8 назв,

Схвалено методичною комісією фізичного факультету УжНУ,

Протокол № 10 від 27 травня 2005 р.

Рецензент: кандидат фіз.-мат. наук, доцент Жихарєв В.М.

Передмова

Методична розробка має за мету допомогти студентам в освоєнні спецкурсу “Основи імпульсної техніки”. Головну увагу в цій розробці звернуто на елементну базу високовольтної сильнострумової імпульсної техніки, яка широко використовується квантовій електроніці, світлотехніці та імпульсних технологіях обробки твердих речовин.. Подано основні відомості про електричний пробій газових проміжків, принципи побудови та механізм роботи іскрових розрядників, розглянуто будову та основні характеристики й режими роботи імпульсних гідрогенних тиратронів. Висвітлено основні характеристики та параметри високовольтних резисторів та конденсаторів, які широко використовуються в високовольтних модуляторах імпульсів тривалістю 10-1000 нс. Наведено основні принципи та конкретні дані про використання газових проміжків в якості ізолюючих для високовольтних імпульсних систем. Розглянуто принцип дії і основні параметри імпульсних високовольтних трансформаторів для імпульсів тривалістю 10-1000 нс..

Навчальний посібник містить перелік рекомендованої літератури з вказівками про розділи та відповідні сторінки періоджерел. Він також включає перелік контрольних запитань для самостійної роботи студентів.

Вказаний навчальний посібник може бути використаний студентами-фізиками інших спеціальностей, а також студентами природничих факультетів, де застосовуються високовольтні імпульсні пристрої.

Зміст

Передмова.	3
1. Фізичні закономірності електричного пробою газів	5
2. Газові розрядники, які працюють в наносекундному діапазоні часів....	11
2.1. Двохелектродні розрядники	11
2.2. Трьохелектродні розрядники	13
2.3. Параметри і характеристики газових розрядників	16
2.4. Області застосування іскрових розрядників	24
3. Гідрогенні імпульсні тиратрони	25
3.1. Втрати потужності в тиратроні.....	28
3.2. Відновлення сіткового запирання і електричної міцності імпульсного гідрогенного тиратрона	29
3.3. Параметри, конструкторська та режими роботи найбільш уживаних імпульсних гідрогенних тиратронів	32
4. Резистори високовольтних наносекундних пристроїв.	36
5. Високовольтні імпульсні конденсатори	38
5.1. Характеристика і режими роботи імпульсних високовольтних конденсаторів.....	40
5.2. Старіння імпульсних конденсаторів	43
6. Імпульсна електрична міцність газових проміжків.....	46
7. Імпульсні трансформатори для високовольтних наносекундних пристроїв	48
8. Контрольні запитання.	50
9. Література.	56

1. Фізичні закономірності електричного пробою газів

В переважній більшості генераторів високовольтних сильнострумівих імпульсів короткої тривалості в якості комунаторів використовують іскрові розрядники. Тому в цих пристроях значну роль при формуванні імпульсів належить процесам, що відбуваються в міжелектродному проміжку іскрового газового розрядника. Так, проміжок часу від моменту прикладання імпульсу до початку формування плазми в комунаторі, визначає час та стабільність спрацювання розрядника. Швидкість формування в проміжку плазми з високою провідністю визначає крутість переднього фронту імпульсу (чим вона більша, тим менша тривалість переднього фронту імпульсу). Максимальна частота стійкої роботи генератора високовольтних імпульсів визначається часом відновлення електричної міцності розрядного проміжку. При використанні газових розрядників також важливо знати від чого залежить пробійна напруга іскрового проміжку.

Розвиток розряду в газовому проміжку починається з появою біля катода ініціюючих електронів і наступним збільшенням струму, який зумовлений процесом іонізації атомів або молекул. Струм i , що протікає між електродами, збільшується за експоненціальним законом:

$$i = i_0 \exp(\alpha x), \quad (1)$$

де i_0 – струм ініціюючих електронів, x – шлях, який пройшли електрони в лавині, α – коефіцієнт ударної іонізації, тобто число електронів, які створюються первинним електроном при проходженні ним 1 см шляху в напрямку електричного поля. Інколи замість коефіцієнта α використовують коефіцієнт η , який означає число нових електронів, створених первинним електроном при проходженні різниці потенціалів 1 В, тобто $\eta = \alpha/E$, де E – напруженість електричного поля в розрядному проміжку. Коефіцієнти α і η є однозначними функціями параметра E/P або E/N (де p – тиск газу, N – концентрація частинок в газі).

Існують два механізми розряду в залежності від характеру його подальшого розвитку:

- повільний механізм, для якого необхідно утворення великої кількості електронних лавин (або таунсендівський механізм);
- швидкий стрімерний механізм, при якому уже перша лавина приводить до пробою (перша лавина – стрімер – канал іскри) (Рис.1).

При таунсендівському механізмі розряду основна роль відводиться вторинній емісії електронів з катоду і послідовному процесу генерації електронних лавин.

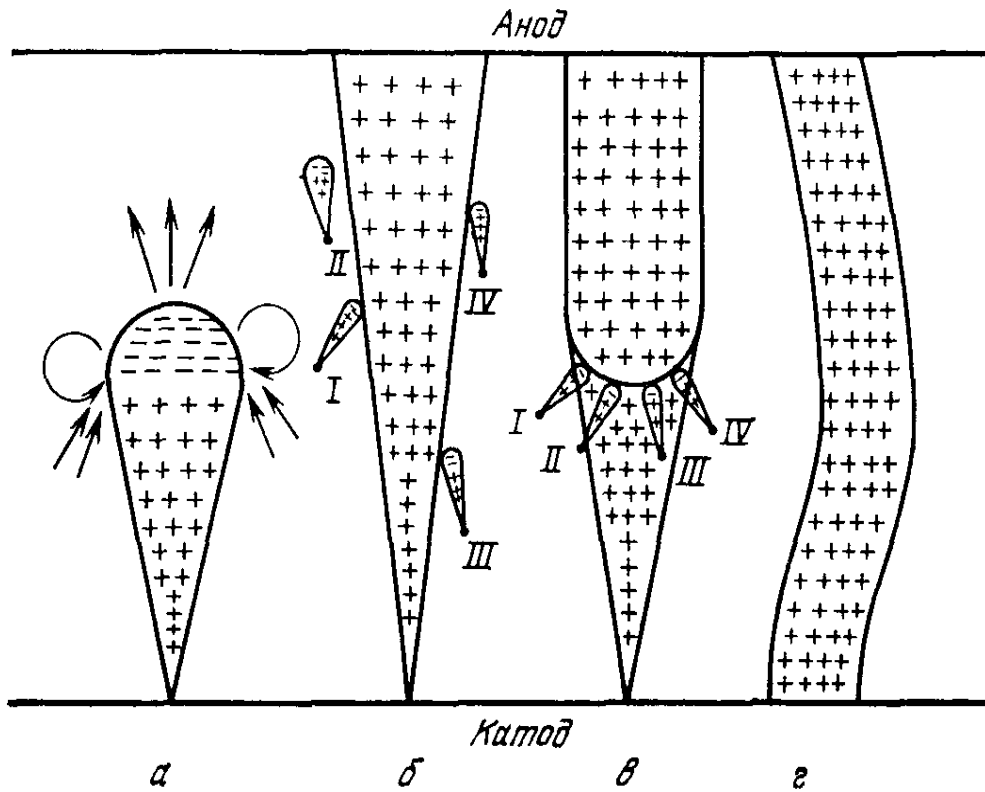


Рис.1 Схема утворення додатного стрімера: а – початок розвитку основної лавини (стрілками наведені силові лінії результуючого електричного поля лавини); б – основна лавина досягла анода (I – IV бічні лавини, що утворюються під дією фотонів); в – бічні лавини зливаються з основною, утворюючи стрімер; г – утворення стрімера завершено.

Коли вторинні електрони виникають в результаті бомбардування катода додатними іонами, то для однорідного поля струм і електронів, що приходить на анод, визначається за формулою:

$$i = i_0 \exp(\alpha x) [1 - \gamma(\exp(\alpha x) - 1)]^{-1}. \quad (2)$$

де d – довжина міжелектродного проміжку, i_0 – струм електронів з катода, який створюється яким - небудь зовнішнім джерелом, γ – число вторинних електронів з катода, які приходяться на один додатний іон.

Коли знаменник у формулі (2) перетворюється в нуль, тоді, згідно теорії Таусенда, відбудеться пробій газового проміжку. При цьому,

$$\gamma[\exp(\alpha x) - 1] = 1. \quad (3)$$

Зазвичай $\exp(\alpha x) \gg 1$, тому вираз (3) переходить в формулу:

$$\gamma \exp(\alpha x) = 1. \quad (4)$$

Остання умова дозволяє визначати пробивну напругу проміжку, коли відомі залежності $\alpha/P = F_1(E/P)$ і $\gamma = F_2(E/P)$. Використавши те, що при напрузі запалювання розряду $U = E d$, одержимо:

$$F_2(U/P d) \exp[P d F_1(U/P d)] = 1, \quad (5)$$

тобто $U = F(P d)$. Подібні залежності називають законом Пашена: якщо добуток довжини розрядного проміжку і тиску газу постійний, то постійна і пробивна напруга цього проміжку.

На рис.2. наведені типові криві Пашена для газів, що використовуються в іскрових розрядниках.

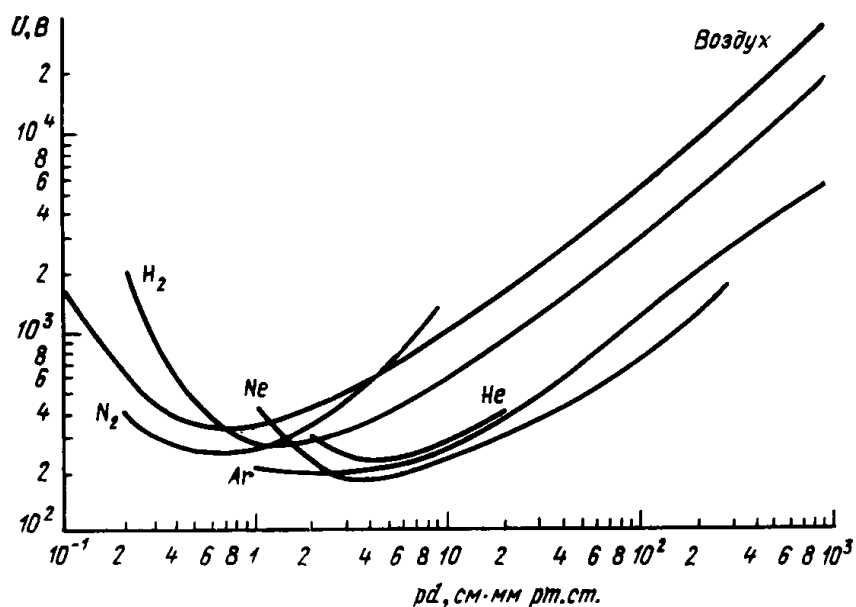


Рис.2. Залежність напруги пробую від добутку $P d$ для різних газів (криві Пашена).

Основна відмінність стрімерного механізму розряду від таунсендівського полягає в тому, що просторовий заряд лавини може сам трансформувати лавину в плазмовий стрімер. Електрони в лавині викликають не лише ударну іонізацію, але і збудження атомів або молекул газу. Збуджені частинки переходячи в основний стан випромінюють кванти світла, які викликають фотоіонізацію газу і появу фотоелектронів.

Електронна лавина досягаючи анода залишає поблизу його поверхні додатні іони, заряд яких, формує додаткове електричне поле напруженістю E_1 . Тому фотоелектрони поблизу анода рухаються до додатного об'ємного заряду в електричному полі напруженістю $E + E_1$, де E – напруженість електричного поля, зумовлена прикладеною ззовні напругою U . Коли E_1 досягає за величиною E , то фотоелектрони, досягнувши додатнього об'ємного заряду, встигають створити нові лавини. Ці лавини компенсують заряд іонів, які знаходяться біля анода, що призводить до формування провідної плазми. Знову виникаючі під дією лавин фотоелектронів додатні іони і фотоелектрони діють за вищенаведеною схемою, і в напрямку до катода швидко поширюється плазмовий стовп, який назвали *додатним стрімером*. Ретер і Мік сформулювали наступну умову формування стрімера: $E_1 = k E$, де k – коефіцієнт порядку одиниці.

Швидкість поширення стрімера в однорідному полі досягає 10^8 см/с. Число електронів в лавині збільшується за законом (1). Число електронів в лавині, при якому поле об'ємного заряду іонів стає порівняним з прикладеним ззовні полем, називається *критичним числом електронів* ($N_{кр}$), а довжина $x_{кр}$ – *критичною довжиною*. Емпірична умова формування стрімера має наступний вигляд:

$$\alpha x_{кр} = 20. \quad (6)$$

Час же формування розряду (τ_p) наближено дорівнює часу розвитку лавини до критичного розміру: $\tau_p = x_{кр}/v$, де v - швидкість дрейфу електронів в лавині. Загальний час запізнення імпульсного пробоя включає в себе, крім часу формування розрядк - τ_p , ще середній статистичний час запізнення або час між моментом прикладання до проміжку напруги і появу “ефективного” ініціюючого електрона (σ_0).

Статистичний час запізнення залежить від інтенсивності попередньої іонізації розрядного проміжку. Якщо i_0 – струм початкових електронів в проміжку, w – імовірність того, що початковий електрон сформує лавину, яка викликає пробій, тоді число розрядів з часом запізнення t і більше визначається за формулою:

$$n = n_0 \exp[-wi_0(t - \tau_p)], \quad (7)$$

де n_0 – загальне число розрядів, τ_p – час формування стрімерного розряду. Середній статистичний час запізнення пробоя: $\sigma_0 = (w i_0)^{-1}$. Для зменшення часу σ_0 необхідно збільшувати струм ініціюючих електронів i_0 , для чого можна використати підсвітку ультрафіолетовою лампою або додатковим іскровим чи коронним розрядом. Освітлення катода УФ випромінюванням викликає фотоефект з катода і значно збільшує число початкових електронів. Інтенсивне опромінення катода з густиною фотоструму $10^{-9} - 10^{-10}$ А/см² призводить до утворення початкового об’ємного заряду в проміжку і понижує пробивну напругу.

При відсутності спеціальних допоміжних джерел електронів розряд ініціюється електронами, які створюються самим катодом. При цьому, джерелами ініціюючих електронів з катода є:

- емісія електронів, зумовлена діелектричними плівками і включеннями на поверхні катода (ефект Мальтера – аномальна емісія через діелектричні плівки на катоді і ефект Петова – автоемісія, посилена зарядженням діелектричних включень на катоді);
- екзоелектронна емісія – емісія електронів з поверхні металічних неметалічних кристалів після дії на них УФ або рентгенівських квантів випромінювання чи тліючим розрядом (ефект Крамера);
- автоелектронна емісія, яка зумовлена проходженням електронів через потенціальний бар'єр (є основним джерелом ініціюючих електронів при $E > 10^5$ В/см).

Після формування в іскровому проміжку стрімера, починається швидке збільшення струму іскри. Опір іскри змінюється, при цьому, від дуже великої величини, до значення, що близьке до нуля. Процес переходу проміжку з непровідного стану в провідний можна характеризувати залежностями напруги U або опору R розрядного проміжку від часу (рис.3).

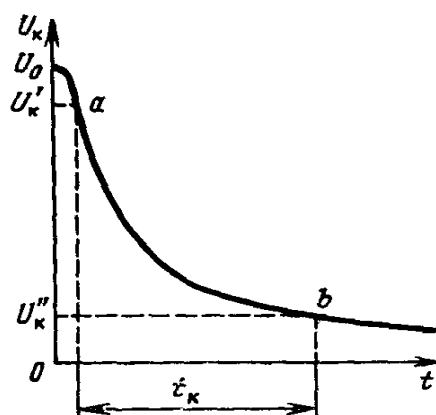


Рис.3. Характеристика комутації іскрового розрядника.

Криву $U(t)$ називають *характеристикою комутації*.

Досить обгрунтовану і точну залежність опору іскри від струму запропонували Ромпе і Вейтцель:

$$R(i,t) = d [2a/P \int i^2 dt]^{-1/2}. \quad (8)$$

Провідність одиниці довжини іскрового розряду $\sigma = i/E (a_0/P) w$, де a_0 – коефіцієнт. На рис.3. наведено характерні залежності коефіцієнта a_0 від часу для різних проміжків. Для повітря і азоту $a_0 = (0,8-1,0) \text{ атм см}^2/(\text{с В}^2)$, а для аргона $a_0 = 30 \text{ атм см}^2/(\text{с В}^2)$, і вони практично не залежать від часу.

Аналіз перехідних процесів в розрядних контурах з врахуванням опору іскри за формулою Ромпе-Вейтцеля вказує, що розвиток розряду визначається параметром; $Z = 2Pd^2/a_0U_0^2$, який є характерним часом збільшення провідності іскри.

З кривих Пашена (рис.2) випливає, що при $P = \text{const}$ і зменшенні довжини розрядного проміжку спостерігається збільшення напруженості електричного поля $E = U/d$, при якому відбувається пробій проміжку, а це приводить до зменшення часу Z , оскільки час Z пропорційний E^{-2} .

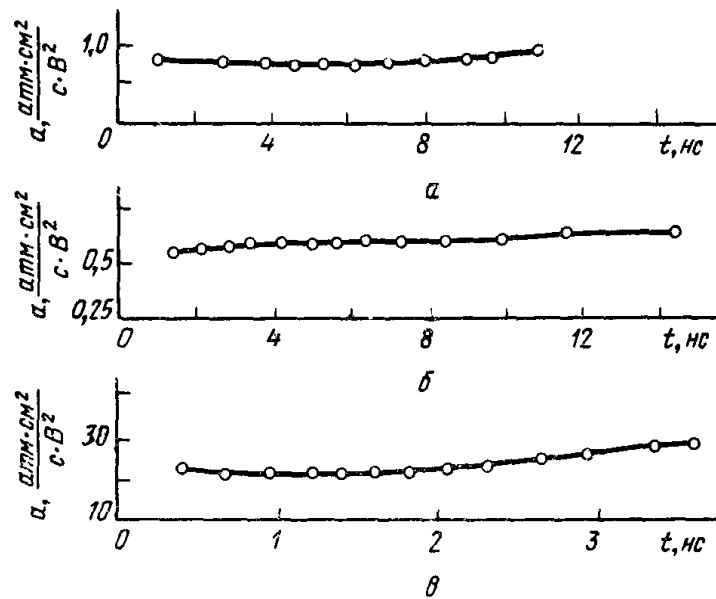


Рис.4. Залежність коефіцієнта a_0 від часу: а – для повітря, $d = 0,24$ см, $P = 1$ атм; б – для азоту $d = 0,42$ см, $P = 1$ атм; в – для аргону $d = 0,78$ см, $P = 1$ атм.

Для міліметрових зазорів і тисках азоту, повітря та інших газів порядку 10 атм величина $Z < 1$ нс. При струмі іскри в декілька кА і більше на процес збільшення провідності іскри починає впливати розширення каналу розряду. Провідність іскрового каналу досягає деякого фіксованого значення і залишається в дальнішому постійною, а опір каналу визначається лише його

розширенням. Допускаючи, що канал іскри однорідний за радіусом i в його плазмі досягається термодинамічна рівновага і що магнітний тиск малий в порівнянні з газокінетичним, залежність опору каналу іскри від часу та струму описується формулою:

$$R(t,i) = d (\rho_0 \xi)^{1/3} / [(4\pi\sigma^2)^{1/3}] i^{2/3} dt, \quad (9)$$

де ρ_0 – густина газу, ξ – коефіцієнт порядку одиниць, σ – питома провідність каналу розряду. Якщо до джерела постійної напруги U_0 підімкнути резистор R через іскровий проміжок, то час, за який збільшиться струм між рівнями 0,1-0,9 від максимального струму $I_0 = U_0/R$ (час комутації t_k) складає:

$$t_k = 11,4 [\rho_0 \xi I_0 / (4\pi\sigma^2 E_0)^{1/3}], \quad (10)$$

де E_0 – початкова напруженість електричного поля в розрядному проміжку. Якщо прийняти $\xi = 4,5$ і $\sigma = 3 \cdot 10^2$ (Ом см)⁻¹, то:

$$t_k = 9 \cdot 10^9 (I_0 P)^{1/3} / E_0, \quad (11)$$

де I_0 – [А]; P – [атм]; E_0 – [В/см].

2. Газові розрядники, які працюють в наносекундному діапазоні часів

Основним застосуванням іскрових розрядників є захист ліній зв'язку і елементів апаратури від небезпечних перенапруг і комутація струму в ланках радіоелектронної та електротехнічної апаратури. Вони широко використовуються в блоках імпульсного накачування потужних лазерів або

імпульсних ламп, які випромінюють в моноімпульсному та імпульсно-періодичному режимі.

Газорозрядні (іскрові) розрядники класифікують за принципом дії (керовані і некеровані), функціями, які виконують, - захисні, комутаційні.., конструктивному виконанню (скляні, металоскляні та металокерамічні). В іскровому розряднику (IP) використовуються властивості імпульсного іскрового, дугового і тліючого розрядів. Розрядники розрізняються в залежності від числа електродів (двох-, трьох- і багатоелектродні), способом запуску (тригатронні, з “спотворенням” поля, запуском променем лазера, підсвіткою УФ або рентгенівськими променями, електронними та іонними пучками), діелектрика, який пробивається (газорозрядні – високо та низького тиску, вакуумні, рідинні і твердотільні), конфігурації електродів (рельсові, кільцеві, кульові, голчаті тощо), числа каналів (іскр) (одно- і багатоканальні), типу розряду (іскрові, з об’ємним чи поверхневим розрядами).

2.1. Двохелектродні розрядники

Найбільш простим і поширеним двоелектродним розрядником високого тиску є проміжок між двома металевими кулями, який заповнений газом при тисках 0,1 МПа і більше. Конструкції типових двоелектродних розрядників наведені на рис.5.

При досить інтенсивному УФ опроміненні розрядного проміжку в повітрі з однорідним електричним полем, яке створюється між плоскими електродами, заокругленими за профілем Роговського, і при частоті 50 Гц він пробивається при напрузі:

$$U_{\Pi} = A P d + B (P d)^{1/2}, \quad (12)$$

де d – довжина проміжку [см], P – тиск [МПа], $A = 245$, $B = 21$. З формули (12) випливає, що при збільшенні тиску зменшується довжина проміжку, при якій розрядник не пробивається. При збільшенні середньої напруженості електричного поля в проміжку до величини більшої за 10^5 В/см формула (12) уже не може використовуватися. Пробій проміжку при локальних полях більших чи рівних 10^6 В/см не залежить від опромінення, а визначається критичним значенням мікрополя на електроді. Це дозволяє використовувати проміжки з

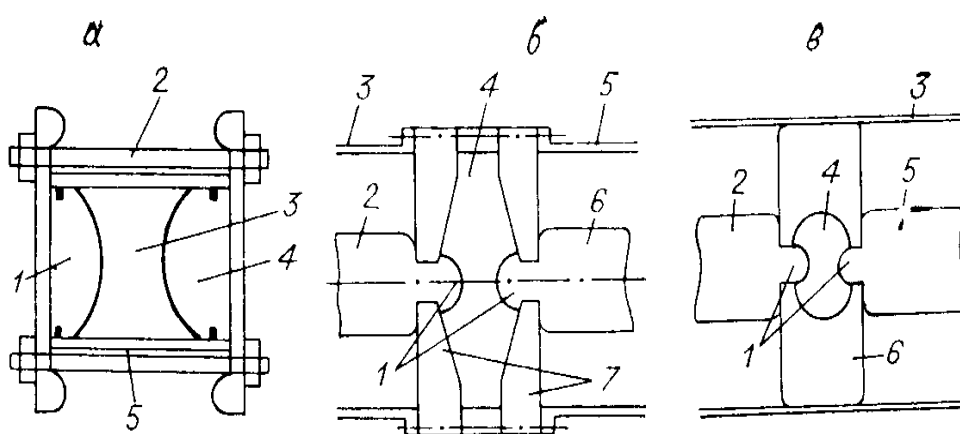


Рис.5. Будова та параметри робочого середовища двохелектродних газових розрядників а: 1,4 – електроди, 2 – шпилька, 3 – SF₆ при

тиску 0,4-0,5 МПа, 5 – корпус; б: 1 – електроди, 2, 6 – внутрішні провідники, 3, 5 – зовнішні провідники, 4 - SF₆ при тиску 0,4-0,5 МПа, 7 - ізолятори; в: 1 – електроди, 2, 5 – внутрішні провідники, 3 – зовнішній провідник, 4 - SF₆ при тиску 1,2-1,5 МПа, 6 – монолітний ізолятор.

різко неоднорідним полем для створення розрядників з високостабільним часом вмикання. Напругу $U_{п}$ інколи називають напругою статистичного пробою оскільки для проміжків з $d < 3$ см вона мало відрізняється від напруги пробою з імовірністю 50% при тривалості імпульсу більшій за 10 мкс. Формулу (12) можна використовувати для розрядного проміжку з сферичними електродами, коли $d < D$, де D – діаметр кульового електрода.

Відомо, що пробивна напруга проміжку збільшується при зменшенні часу дії. Це відбувається з двох причин: не встигає появитися ефективний електрон, який викликає лавиноподібне збільшення провідності проміжку і його пробій; провідність не встигає збільшитися в достатній ступені навіть при наявності ефективного електрона в проміжку з самого моменту прикладання напруги. Звідси випливає наступний висновок: пробивна напруга проміжку при імпульсній дії залежить від способу ініціювання початкових електронів, інтенсивності процесу ініціювання, стану поверхні електродів, їх матеріалу, кількості проведених розрядів та інших чинників.

Пробивна напруга $U_{\text{п}}$ при прикладанні прямокутних імпульсів до проміжку залежить від ступені і виду опромінення, причому залежність від інтенсивності опромінення має логарифмічний характер.

Якщо на електроди двохелектродного ІР подати високу напругу, достатню для його пробою, то розрядник пробивається. Опір міжелектродного проміжку при цьому зменшується до 0.1-0,01 Ом, а напруга на проміжку за час $t_k = 1-100$ нс (t_k – час комутації) спадає до сотень вольт. В момент пробою через проміжок проходить практично струм короткого замикання, величина та форма якого буде залежати від опору і типу навантаження. Струм буде проходити через високоіонізований канал розряду до тих пір, поки енергія, яка передається від джерела живлення в канал розряду в одиницю часу, не стане меншою потужності втрат розряду. Як тільки це відбудеться, то розряд згасає. Наступає деіонізація міжелектродного проміжку і розрядник повертається в початковий стан. Час комутації розрядника залежить від сорту та густини газу, імпедансу розрядного контура і пробивної напруженості електричного поля $E_{\text{п}} = U_{\text{п}}/d$. Він збільшується при збільшенні d і густини газу та зменшується при зростанні пробивної напруженості електричного поля в більшій мірі, ніж при збільшенні d , а також зменшується при збільшенні імпедансу розрядного контуру. Для збільшення ресурсу роботи двохелектродного розрядника необхідно зменшувати перенесений за імпульс заряд, збільшувати площу електродів,

використовувати продування газом міжелектродного проміжку після кожного розряду, а електроди виготовляти з тугоплавких металів чи сплавів.

2.2. Трьохелектродні розрядники

Розглянемо роботу типових трьохелектродних іскрових розрядників, які використовують в генераторах високовольтних імпульсів (до 20-50 кВ) малої або середньої потужності.

Керувати роботою іскрового розрядника можна збільшенням напруженості електричного поля в газових проміжках або послабленням їх електричної міцності. Типовий трьохелектродний розрядник має наступну конструкцію (Рис.6). Електрод 2 зазвичай з'єднаний з джерелом постійної високої напруги U , а електрод 1 заземлений через опір навантаження. Довжина проміжку 2 – 3 вибрана такою, щоб він не пробивався при напрузі U , а проміжку 1-3 такою, щоб він не пробивався під дією запускаючого імпульсу. При поступленні на електрод 3 запускаючого імпульсу з полярністю, яка обернена U , пробивається проміжок 2 – 3 і середній електрод приймає потенціал U . Якщо співвідношення довжин проміжків таке, що $d_{2-3}/d_{1-3} = 2$ (рис.6.а.), то розрядник має найбільший

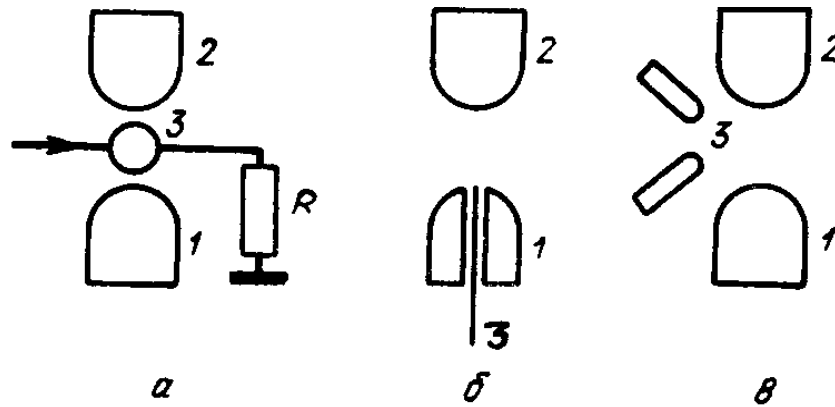


Рис.6. Схематичне розміщення електродів в трьохелектродних комутаторах: 1, 2 – основні електроди, 3 – запускаючий електрод.

двократний діапазон робочої напруги. Для зменшення часу затримки запуску розрядника і підвищення стабільності цього часу необхідно збільшити амплітуду і крутість запускаючого імпульсу. При крутості фронту запускаючого імпульсу 40-50 кВ/мкс і його амплітуді 50-70 % від U розкид часу складає 10 нс. Робота розрядника значно прискорюється і стабілізується якщо проміжки 2-3 і 1-3 опроміювати ультрафіолетом. Джерелом УФ випромінювання може бути іскра, яка формується в допоміжному проміжкові, який ввімкнений послідовно з кабелем, по якому подається імпульс запуску. При цьому стабільність часу t_3 буде не гіршою за 1 нс. Трьохелектродні розрядники для генераторів високовольтних наносекундних імпульсів характеризуються великою амплітудою запускаючого імпульсу і вузьким діапазоном робочих напруг.

Розглянемо роботу розрядника, схема якого наведена на рис.6.б. Після поступлення запускаючого імпульсу на стержневий електрод 3 між

електродами 3 і 1 проскакує іскра. Це ініціює пробій основного проміжку між електродами 1 та 2. Для запуску тригатрона з наносекундною точністю і найбільшій робочій напрузі 50 кВ він був заправлений фреоном ($P = 0,14$ атм). Час затримки між приходом запускаючого імпульсу і спрацюванням тригатрона, якщо полярність імпульсу запуску і потенціала на незаземленому електроді протилежні, не переважав 20 нс з розкидом в межах 1 нс (при запускаючому імпульсі амплітудою 32 кВ з тривалістю фронту 20). Для зменшення амплітуди запускаючого імпульсу тригатрона його запалюючий електрод покривають тинатом барію – діелектриком з високою діелектричною проникністю ($\epsilon > 1000$). Між діелектричним покриттям електрода 3 і електродом 1 існує невеликий зазор, до якого при поданні запускаючого імпульсу прикладається майже вся напруга. В цьому ж тригатроні, заправленому атмосферним повітрям, найбільша робоча напруга не перевищувала 25 кВ, час затримки складав 17 - 65 нс, а розкид часу затримки був меншим за 3 нс. Амплітуда запускаючого імпульсу складала 0,5 - 1,0 кВ при тривалості фронту 5 нс.

Іскрове реле (рис.6.в) має два іскрові проміжки: основний між електродами 1 і 2 та запуску 3. Ультрафіолетове випромінювання іскри з проміжку 3, потрапляючи на катод 2, приводить до появи фотоструму з катода, який ініціює пробій основного проміжку. При недонапрузі на основному проміжку 1-2 % і робочій напрузі 10 кВ час запізнення не перевищував 10 нс.

Основною перевагою газового іскрового реле є повна ізоляція між запускаючим і основним проміжками та висока стабільність часу затримки, а недоліком – вузький діапазон робочих напруг.

На рис.7. наведений поперечний перетин потужного трьохелектродного розрядника, який має малий час і високу стабільність спрацювання та керується за принципом “викривлення” поля.

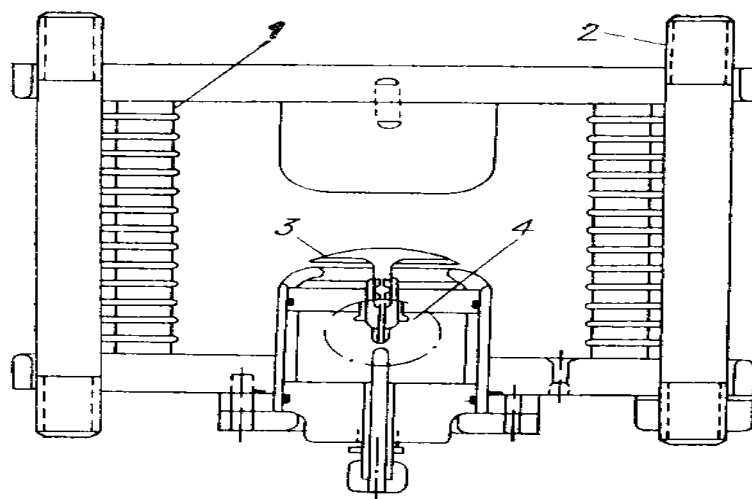


Рис.7. Конструкція газового розрядника з “викривленням” поля.

1 – акрілик, 2 – нейлонові шпильки, 3 – запускаючий електрод, 4 – ізолюючий розрядник.

Для зменшення розмірів розрядника і його індуктивності використовували елегаз при тиску біля 1 МПа. При цьому час запізнення пробою також зменшувався, оскільки при збільшенні середнього електричного поля в проміжку зменшується час формування провідного плазмового каналу.

Основні електроди були в формі циліндрів діаметром 10 см з заокругленими кромками (матеріал - нержавіюча сталь). Міжелектродна віддаль дорівнювала 7,5 см. Запускаючий електрод був виготовленим в формі диску діаметром 7 см і викривлений так, щоб його профіль максимально співпадав з конкретною еквіпотенціаллю поблизу запускаючого електрода. По поступленні на цей електрод імпульсу запуску відбувається підсилення електричного поля на кромці (підсилюється середнє електричне поле між запускаючим і найближчим основним електродом, а також локального поля на кромках диску). В залежності від радіуса заокруглення кромки запускаючого електрода підсилення електричного поля може складати декілька сотень.

Щоб забезпечити малий розкид часу пробою – порядку 1 нс – і стабільне керування, необхідно зменшити час формування розряду до 10 нс і збільшити напруженість електричного поля. Ефективність запуску розрядника залежить переважно від радіуса заокруглення кромки. Це дозволяє навіть при великих основних проміжках і практично центральному розташуванні запускаючого електрода забезпечувати запуск розрядника імпульсом, амплітуда якого на порядок менша, ніж основного імпульса. Для виготовлення корпусу розрядника використано акрілові ізолятори, який характеризується високою електричною міцністю.

Таким чином, трьохелектродні розрядники складається з трьох електродів, встановлених в герметичну оболонку, яка заповнюється інертними

газами, сумішами інертних газів, вуглекислим газом, гідрогненом, повітрям, сумішами кисню з парами води або елегазом. Тиск газоподібного середовища в балоні ІР складає від декількох десятків до декількох тисяч мм рт. ст. В ІР найбільш часто використовують активовані електроди: окисдований або торирований вольфрам, нікель, покритий калієм чи барієм, сплави вольфраму, нікелю і оксиду барію. Застосовують також і чисті метали: вольфрам, нержавіюча сталь, молібден і алюміній.

2.3 Параметри і характеристики газових розрядників

Коротко розглянемо основні параметри і характеристики іскрових розрядників.

2.3.1. **Статична напруга пробою.** Згідно закону Пашена, напруга пробою проміжку залежить від добутку тиску газу на віддаль між електродами, тобто $U_{\text{пр}} = f(p, d)$. Криві Пашену мають дві-гілки – праву і ліву. Права гілка відноситься до області високих тисків, а ліва – до області низьких тисків. В більшості випадків іскрові розрядники заповнюються газом до високих тисків, тому напруга пробою розрядника відповідає правій гілці кривої Пашена. **Статичною напругою пробою іскрового розрядника** називається напруга пробою міжелектродного проміжку, яка відповідає кривій Пашена. При сталому добутку тиску газу на віддаль між електродами ($p \cdot d$) напруга пробою

залежить від коефіцієнтів α та γ (де: α - коефіцієнт об'ємної іонізації або перший коефіцієнт Таунсенда, а γ – коефіцієнт поверхневої іонізації). Пробій настає коли виконується умова переходу розряду з несамостійного в самостійний (див формулу 2). Перший коефіцієнт іонізації Таунсенда входить в показник ступені формули (2), тому здійснює найбільш значний вплив на напругу пробою розрядника.

2.3.2. Електрична стійкість розрядника. Застосовується до керованих розрядників. Цей параметр характеризує надійність роботи розрядників при напругах, близьких до верхньої межі діапазону робочих напруг. При правильному виборі електричної міцності повністю виключається самовільний пробій розрядника на верхній межі діапазона робочих напруг без подачі керуючого імпульсу на запалюючий електрод.

2.3.3. Динамічна напруга пробою і час запізнення.

Динамічна напруга пробою визначається за формулою:

$$U_{\text{дин}} = U_{\text{ст}} + \tau_{\text{зап}} (dU/dt), \quad (13)$$

де: $\tau_{\text{зап}}$ – час запізнення запалювання розрядника, dU/dt – швидкість збільшення напруги на розряднику.

Динамічна напруга пробою завжди вища за статичну. Якщо швидкість збільшення напруги на розряднику в кожному конкретному випадку

визначається параметрами електричної схеми, де використано розрядник, то час запізнення запалювання розрядника залежить від умов експлуатації та конструкції самого розрядника. Час запізнення запалювання залежить від швидкості утворення вільних електронів в міжелектродному проміжку, тобто від інтенсивності зовнішніх іонізаторів. Оскільки утворення заряджених часток в міжелектродному проміжку під дією зовнішньої іонізації має випадковий характер, то і тривалість часу запізнення запалювання є величиною випадковою. Вона характеризується не лише своїм середнім значенням, а й деяким законом розподілу:

$$F(t) = 1 - \exp(-t/\tau_{\text{ЗАП}}), \quad (14)$$

де: $\tau_{\text{ЗАП}} = (p_0 v)$, v – швидкість утворення вільних електронів в проміжку під дією зовнішнього іонізатора, p_0 – імовірність того, що кожен з цих електронів може привести до пробію за одиницю часу.

Для отримання стабільної роботи розрядника за напругою пробію необхідно мати як можна менший час запізнення пробію.

Для зменшення величини $\tau_{\text{ЗАП}}$ використовують опромінення міжелектродного проміжку УФ випромінюванням або введенням в проміжок невеликої кількості радіоактивного ізотопу.

На величину часу запізнення пробію значний вплив здійснює також вид газу-наповнювача, тиск, геометрія розрядного проміжку та величина

перенапруги та активності ізоотопу Ni^{63} в міжелектродному проміжку (рис.8). Найбільш значний вплив наявності радіоактивного випромінювання було одержано при малій активності ізоотопу, а при її збільшенні час запізнення запалювання розрядів виходив на майже сталу величину. Зв'язок $\tau_{ЗАП}$ з міжелектродною віддаллю і родом газу виражається за формулою

$$\tau_{ЗАП} = \text{const} \exp(-\alpha d), \quad (15)$$

Тобто час запізнення повинен експоненціально зменшуватися при збільшенні віддалі між електродами (d) і першого коефіцієнта Таунсенда – α . При однакових напругах пробою і рівних віддаль між електродами найменший час запізнення пробою отримано в ксеноні, водні, трохи більше в аргоні і він є максимальним в гелії та неоні. При збільшенні коефіцієнта перенапруги $\tau_{ЗА}$ зменшується.

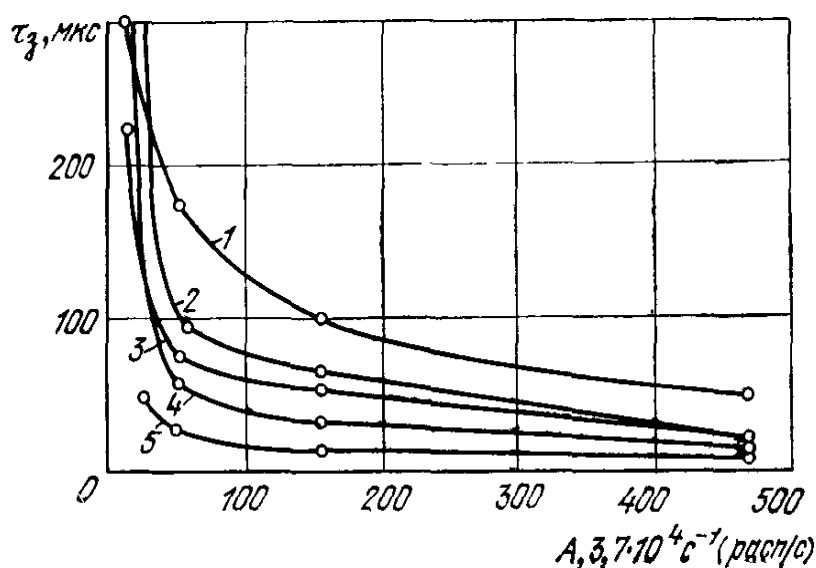


Рис.8. Залежність часу запізнення запалювання розряду в інертних газах і гідрогені від активності ізотопу в міжелектродному проміжку.

На рис.9. приведена залежність логарифму часу запізнення від коефіцієнта об'ємної іонізації α . Відхилення експериментальних точок від прямої лінії незначне, тому співвідношення (15) добре виконується. Заючи залежність коефіцієнта об'ємної іонізації від міжелектродної віддалі і тиску газу, можна розрахувати і час запізнення, коли він відомий хоча би при одному значенні α . Величина α для даного газу однозначно визначається відношенням E/P , для обрахунку якого необхідно знати величину напруги в міжелектродному проміжку, віддаль між електродами і тиск газу.

Вимірювання та розрахунки показали, що при однаковій напрузі пробою і рівних віддаль між електродами найменший час запізнення спостерігається при розряді в ксеноні, гідрогені, дещо більший – в аргоні і максимальний – в неоні та гелії. При збільшенні коефіцієнта перенапруги (K) час запізнення зменшується (Рис.10).

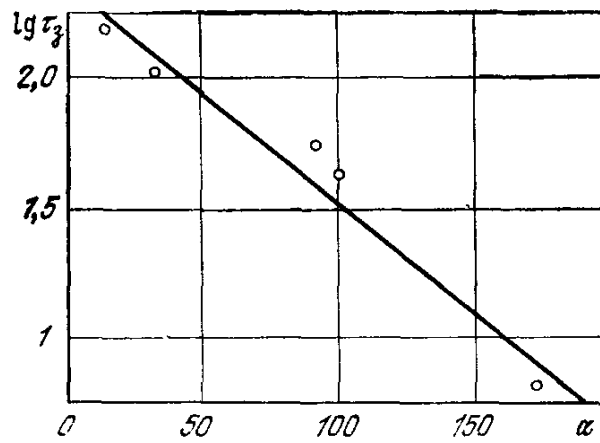


Рис.9. Залежність логарифма часу запізнення пробою від коефіцієнта об'ємної іонізації

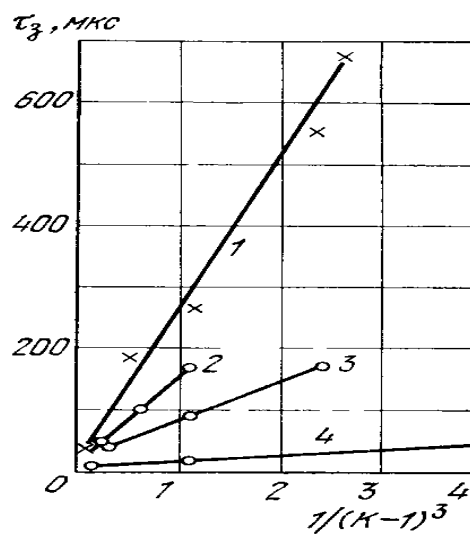


Рис.10. Залежність часу запізнення пробою від величини коефіцієнта перенапруги в інертних газах та гідрогені.

1 – гелій, 2 – аргон, 3 – гідроген, 4 – ксенон.

Залежність часу запізнення від коефіцієнта K виражається простою степеневою функцією $\tau_{зп} = \tau_3/(K-1)^n$. З рис.10. випливає, що вищенаведена формула при $n = 3$ досить точна і може використовуватися як емпірична при $K = 1,1 - 3$ для всіх інертних газів і гідрогену. Для молекулярних же газів: кисню, азоту, осису вуглецю ця формула справедлива при $K = 1,5 - 4$.

2.3.4. Втрати потужності в іскрових розрядниках розраховують за формулою:

$$P = (T)^{-1} \int [i(t) U(t) dt, \quad (16)$$

де: $i(t)$, $U(t)$ – миттєві значення струму і напруги за час імпульсу τ_1 .

Ці втрати потужності в розряднику складаються переважно з втрат в катодній області, які залежать, головним чином, від матеріалу електрода і роду робочого газу, а також втрат в позитивному стовпі іскрового розряду. Вони залежать також від міжелектродної віддалі. При збільшенні роботи виходу матеріалу катода і потенціалу іонізації робочого газу втрати потужності в розряднику збільшуються.

На рис.11. наведена типова осцилограма падіння напруги на газовому розрядникові при аперіодичному розряді конденсатора. Заючи миттєві струм і напругу за деякий час τ_1 можна за формулою (16) розрахувати потужність, яка виділяється в розряднику.

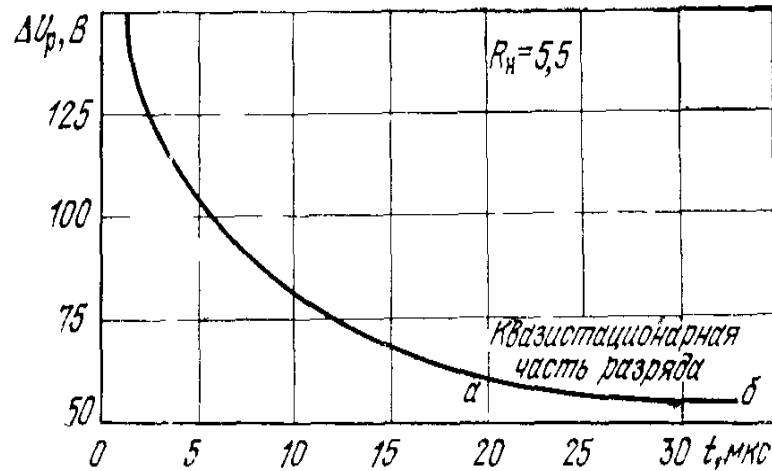


Рис.11. Типова осцилограма падіння напруги на розряднику при аперіодичному розряді конденсатора при $R_H = 5,5$ кОм.

7.3.5. Час відновлення електричної міцності розрядника.

Частотні властивості іскрових розрядників визначаються часом відновлення електричної міцності міжелектродного проміжку. В початкові моменти після закінчення дії електричного імпульсу на газ швидкість відновлення міцності проміжку визначається швидкістю спаду концентрації зарядів. Коли ж концентрація зарядів в стовпі плазми стає такою малою, що під дією прикладеної напруги, яка дорівнює електричній міцності проміжку, іонний шар поширюється на весь проміжок від катода до анода і це сприяє пробою всього проміжку. На цьому проміжку часу швидкість відновлення електричної міцності розрядника визначається швидкістю охолодження плазми

між електродами і пов'язаним з цим перерозподілом густини газу. Верхня межа робочих частот промислових іскрових розрядників знаходиться в межах 20-200 Гц з збільшується при збільшенні теплопровідності газу і зменшенням амплітуди коמוтованого струму.

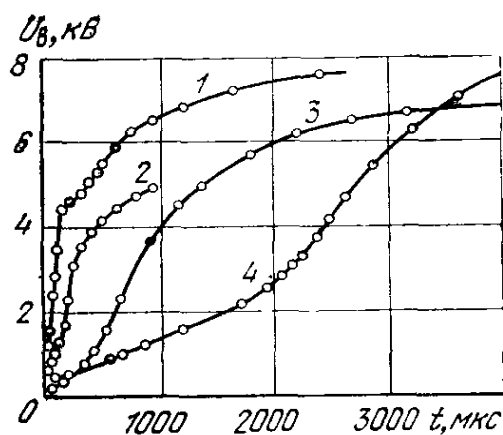


Рис.12. Криві відновлення електричної міцності міжелектродних проміжків в різних газах.

1 – гідроген, 2 – кисень, 3 – аргон, 4 – азот.

На рис.12 приведені експериментально визначені криві відновлення електричної міцності міжелектродних проміжків в різних газах. Вони мають два різних участки, що відрізняються різним нахалом. На початковій ділянці кривої швидкість відновлення електричної міцності визначається швидкістю зменшення концентрації зарядів або швидкістю збільшення товщини плівки.

2.3.6. Потенціал згасання розряду в іскровому розряднику,

визначається наступним співвідношенням:

$$U_{згс} = \text{const } C^{1/2} P^{1/2} M^{1/2} T^{1/2 - 1/2}, \quad (17)$$

де: C – атомна теплоємність, T – температура, M – молекулярна вага газу, p – тиск, U – напруга на конденсаторі.

Для збільшення потенціалу згасання при конструюванні іскрових розрядників використовують багатоелектродні конструкції. Для всіх газів потенціал згасання розряду збільшується при збільшенні питомої теплоємності газу. В молекулярних газах потенціал згасання вищий, ніж в інертних газах.

2.3.7. Діапазон робочих напруг. Ця характеристика відноситься лише до керованих розрядників (з трьома і більше електродами і наявністю керуючих електродів). Під *діапазоном робочих напруг розрядника* розуміють такий діапазон напруг між анодом і катодом, в межах якого розрядник пробивається лише при подачі керуючого імпульсу. Існує верхня і нижня межа діапазону робочих напруг. За верхню межу діапазону приймають максимальну робочу напругу між анодом і катодом, при якій ще не виникають самовільні пробої розрядника при відсутності керуючого імпульсу на запалюючому електроді. Нижня межа діапазона визначається мінімальною напругою, при якій

розрядник надійно пробивається без пропусків при дії напруги керуючого імпульсу.

Максимальна ширина робочого діапазона напруг в розряднику одержується коли запалюючий електрод знаходиться в середині розрядного проміжку «анод – катод». При цьому, імовірність запалювання допоміжного розряду на анод складає 50 % і з'являється область нестійкої роботи ІС. Тому запалюючий електрод встановлюють зазвичай на віддалі 0,35-0.40 довжини проміжку “анод-катод”, щоб зменшити імовірність запалювання допоміжного розряду між керуючим електродом та анодом. Ширина діапазона робочих напруг, при цьому, зменшується мало.

Типова статична характеристика запалювання керованого газового розрядника наведена на рис.13. Абсциси точок б і г статичної характеристики рівні напрузі пробною проміжку анод – запалюючий електрод відповідно при негативному та позитивному потенціалах останнього. Після запалювання допоміжного розряду напруга між електродами розрядника стрибком зменшується.

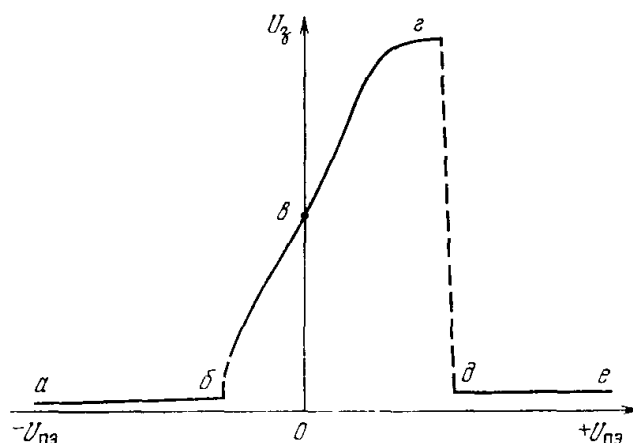


Рис.13. Статична характеристика запалювання керованого розрядника.

При додатньому потенціалі запалюючого електрода (участок д – е, допоміжний розряд горить) при збільшенні анодної напруги збільшується діаметр плазмового каналу допоміжного розряду, свічення розряду проникає в область між запалюючим електродом і анодом. Після цей проміжок пробивається.

При негативному потенціалі керуючого електрода (участок а – б, допоміжний розряд горить) пробій відбувається в дві стадії. При зростанні анодної напруги допоміжний розряд перекидується і горить між катодом і запалюючим електродом. Основний проміжок пробивається лише тоді, коли анодна напруга досягає напруги пробою між катодом і запалюючим електродом. При цьому в проміжку катод – запалюючий електрод свічення не видно, а пробій відбувається при напругах, близьких до статичних напруг пробою цього проміжку. Участок характеристики б – в – г відповідає області

напруг, в якій відбувається “електростатичне” керування запалюванням. Пробій тут відбувається також в дві стадії: спочатку пробивається проміжок “анод – запалюючий електрод”, після – основний проміжок.

Розглянемо залежність ширини робочого діапазону напруг від положення запалюючого електрода. На рис.14. наведена залежність максимальної і мінімальної робочих напруг від відносної віддалі між катодом і запалюючим електродом. З рис.14. випливає, що при віддаленні запалюючого електрода від катода ширина робочого діапазону напруг збільшується доти, поки електрод не потрапить в середину проміжку анод – катод.

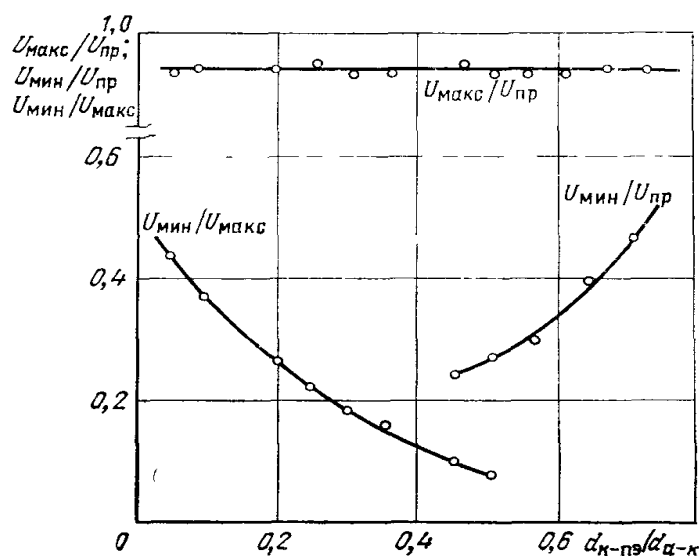


Рис.14. Залежність максимальної і мінімальної робочих напруг від відношення міжелектродних віддалей.

2.3.8. Довговічність, розпилення електродів, поглинання газів.

Основні процеси, які обмежують ресурс роботи іскрових розрядників, це: *розпилення матеріалу електродів та пов'язане з ним поглинання газів*, які заповнюють прилад. Фізичною причиною розпилення матеріалу електродів є бомбардування катода іонами. Для простого випадку релаксаційного генератора з розрядом конденсатора на активний опір, швидкість розпилення матеріалу електродів описується наступним виразом:

$$D = P_2^{-1} (M + m)^{-1/2}, \quad (18)$$

де: P_2 – тиск газу в розряднику, M , m – маса атомів металу і газу. Тобто швидкість розпилення електродів оберненопропорційна тискові наповнюючого газу і не залежить від роду газу і матеріалу електродів (P_2 зазвичай змінюється від 5 до 100 кПа).

Поглинання газу в розряднику пов'язано з катодним розпиленням: частинки при розпиленні матеріалу електродів адсорбують газ. Найбільш сильно адсорбуються хімічно активні гази (O_2 , H_2 тощо). Пониження тиску в розряднику призводить до зменшення пробивної напруги, а розпилені частки напиляються на внутрішній діелектричній поверхні розрядника і зменшують опір ізоляції та створюють значні поверхневі струми. Це приводить до виходу розрядника з ладу.

Швидкість поглинання газу прямопропорційна швидкості розпилення матеріалу електродів. Для гідрогену швидкість поглинання складає: 6,8 л мг/імп., а для інертних газів вона значно менша і зменшується при збільшенні атомної ваги інертного газу ($V_{\text{He}} = 11,8 \cdot 10^{-5}$, а $V_{\text{Xe}} = 0,8 \cdot 10^{-5}$ л мг/імп.).

На рис.15. наведено залежність швидкості розпилення електродів від тиску газів. Ці залежності добре відповідають формулі (18) і виконуються в досить широкому діапазоні тисків газу (10 – 100) кПа.

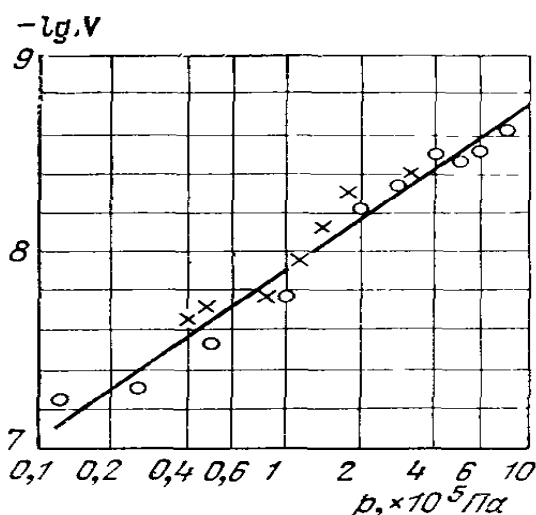


Рис.15. Залежність швидкості розпилення матеріалу електродів з молібдену від тиску: о – ксенон; х – гелій.

2.4. Області застосування іскрових розрядників

Іскрові розрядники поступають імпульсним тиратронам і напівпровідниковим приладам за довговічністю, втратам потужності і максимальними частотами роботи. Простота конструкції і відсутність нагрівного елемента дозволяють імпульсним розрядникам успішно конкурувати з гідрогенними тиратронами, особливо коли необхідна миттєва готовність пристрою до роботи, малі габарити і маса, стійкість до кліматичних та механічних перевантажень. Від напівпровідникових пристроїв ІР вигідно відрізняються високою температуростійкістю можливістю роботи при високих напругах і стійкістю до перевантажень за струмом.

Враховуючи, що на даний час мінімальна тривалість імпульсів струму гідрогенного тиратрона складає 50-100 нс, а у тиристорів вона переважає 1 мкс, тому зрозуміло, що іскрові розрядники є єдиними пристроями, які придатні до використання в високовольтній наносекундній техніці.

Існують дві великі області застосування іскрових розрядників:

- 1).захист ліній зв'язку і елементів апаратури від перенапруг;
- 2).комутація ланцюгів в різних електронних пристроях.

Більш конкретні застосування ІР є такими: захист вхідних ланок радіоприймальних приладів, комутація ланок в дифібриляторах, лічильках іонів, комутація високовольтних імпульсів на ренгенівські трубки, загострення і розширення імпульсів, джерелах живлення імпульсних лазерів і ламп тощо.

3. *Гідрогенні імпульсні тиратрони.*

Тиратроном – називають трьохелектродний комутуючий елемент, який має нагрівний (або холодний) катод, сітку та анод і який заповнений газом або парою металів (переважно ртуті). В сильнотривовій імпульсній техніці основне застосування знайшли гідрогенні тиратрони з нагрівним катодом. У них сітка використовується для керування запалюванням дугового розряду в основному робочому проміжку тиратрона. Керуюча сітка в цих тиратронах виготовлена в вигляді тонкої металевої пластини з круглим (прямокутним) отвором або в формі диску з багатьма отворами. У спеціальних тиратронах – ***таситронах, використовується*** густа металева сітка.

Існують два основні способи керування режимом роботи сітки тиратронів:

- а). електростатичне керування;
- б). керування з допомогою допоміжного струму в проміжку “сітка-катод”.

При електростатичному керуванні від’ємна напруга зміщення на сітці різко послаблюється в момент часу, коли необхідно відкрити тиратрон, або негативний потенціал сітки замінюють додатним щоб забезпечити проходження через сітку достатнього для запалювання основного розряду потоку електронів з катоду. Режим керування з допомогою струму застосовують при малій проникності сітки, або сильно заекранованому аноді. У обох випадках навіть при нульовому потенціалі сітки додатне поле анода в області “сітка-катод” є настільки слабким, що число витягнутих ним електронів

з електронної хмаринки біля катода недостатнє для формування плазми в проміжку “сітка-анод”.

Для збільшення числа ініціюючих електронів, які проходять через сітку, на неї подають такий високий додатний потенціал (імпульс), що в проміжку “сітка-катод” запалюється допоміжний розряд. Він є постачальником електронів в проміжок “сітка-анод”. Оскільки число зарядів, які дифундують і дрейфують в область “сітка-анод”, залежить від концентрації зарядів в допоміжному розряді, і пропорційний сітковому струму, то момент запалювання основного розряду визначається сітковим струмом. В цьому якраз і полягає принципова відмінність керування струмом від електростатичного керування, зумовленого лише станом поля в проміжку “сітка-катод” тиратрона.

Кількісний зв'язок між анодною і сітковою напругами, відповідають моменту запалювання розряду в тиратроні при електростатичному способі керування, відбиває анодно-сіткова характеристика запалювання (рис.16).

Для потужних гідрогенних тиратронів типу ТГИ 1 1000/25, які розраховані на струм в імпульсі до 1000 А (для імпульсів мікросекундної

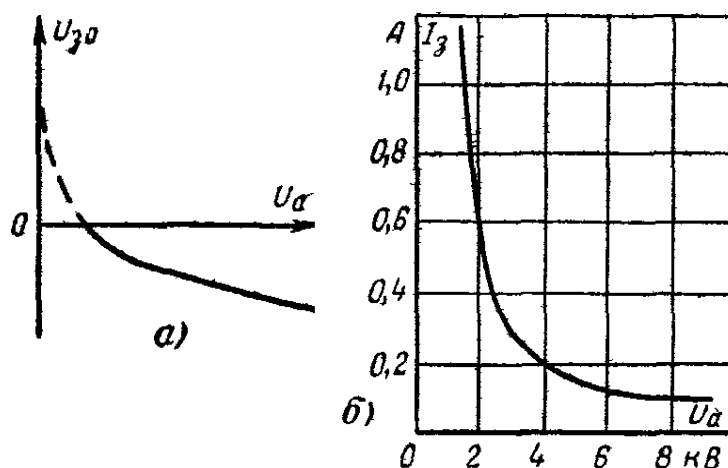


Рис.16. Негативна (а) та додатна (б) анодно-сіткові характеристики тиратронів.

тривалості) і робочі напруги до 25 кВ і які широко використовуються в джерелах накачування газових лазерів, використовують керування з допомогою струму в проміжку “сітка-катод”. Тут для формування плазми в анодно-сітковій області необхідним є накопичення деякої кількості іонів. Оскільки ці іони створюються з допомогою електронів допоміжного розряду, то на їх накопичення необхідний деякий час, який залежить від швидкості наростання сіткового струму di_c/dt . Типові осцилограми, що ілюструють роботу гідрогенних тиратронів, наведено на рис.17.

Зростання потенціалу на сітці U_c триває до кінця часу затримки сіткового струму Q_{c3} . На цьому етапі через сітку проходить лише передрозрядний сітковий струм. З переходом до формування основного сіткового струму потенціал сітки U_c знижується.

В момент формування струму в колі сітки в проміжку “сітка-анод” появляються за рахунок дрейфу та дифузії заряди з проміжку “сітка-катод”. Спочатку інтенсивність дифузії зарядів мала, тому до $t = t_{A,3}$ триває етап затримки анодного струму $Q_{A,3}$. При збільшенні же кількості електронів і іонів в проміжку “сітка-анод” анодне поле починає безпосередньо діяти на плазму сіткового розряду. При цьому, до дифузії додається і дрейф зарядів від катода до анодної області. Цей процес супроводжується різким збільшенням U_C із-за зменшення густини електронів в плазмі між сіткою і катодом і кладе початок формуванню анодного струму.

Значення струму в колі сітки i_C , яке відповідає початку формування анодного струму, називають *пусковим струмом сітки $i_{C,п}$* . Переміщення електронів анодним полем з проміжку “сітка-катод” пов’язано з наступним підсиленням електронного потоку, який підвищує інтенсивність іонізації. Це призводить до відновлення нормального режиму сіткової плазми, тому U_C швидко зменшується, досягаючи після декількох коливань, стаціонарного значення ΔU_C .

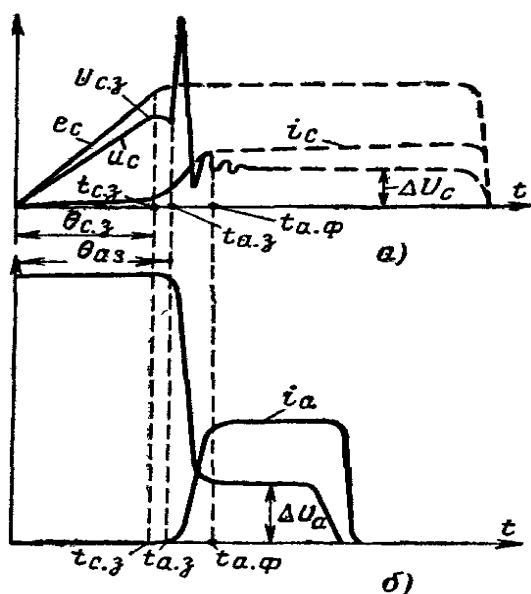


Рис.17. Криві напруги і струму в сітковій (а) та анодній (б) ланках гідрогенного тиратрона.

Етап формування анодного струму $Q_{АФ}$ продовжується до досягнення їм значення, близького до максимальної амплітуди анодного струму.

Тривалість етапу затримки струму сітки $Q_{СЗ}$ визначається геометричним фактором (числом отворів n , діаметром d , висотою сітки h та ступінню перекриття екраном отворів сітки) і залежить від швидкості наростання напруги на сітці. Для гідрогенного тиратрона ТГІ1 –130/10 відповідні криві наведено на рис.18.

Збільшення $U_{с.з.}$ при збільшенні dU/dt пояснюється необхідністю накопичення деякої кількості зарядів в проміжку “сітка-катод”, щоб створити

необхідне для запалювання розряду електричне поле в міжелектродному проміжку.

Час запізнення $Q_{a.z.}$ більше залежить від роду та тиску газу. Час формування розряду $Q_{ф.р.}$ в імпульсних гідрогенних тиратронах залежить як від геометричних чинників, так і від фізичних (тиску водню, анодної напруги тощо). До геометричних чинників впливу, крім ступеня віддаленості сітки від

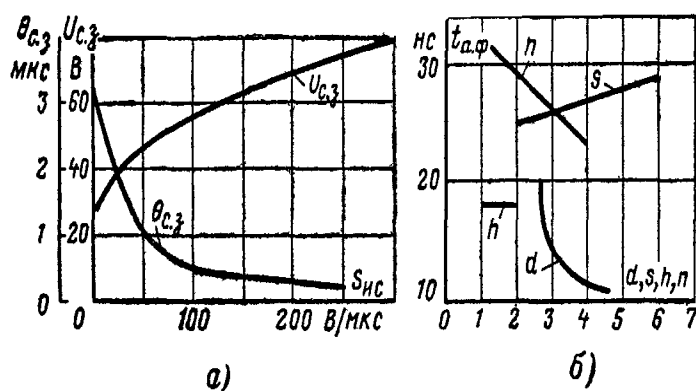


Рис.18. Залежності напруги запалювання і часу затримки розряду на сітку від крутості сіткового імпульсу (а); залежність часу формування основного розряду від різних геометричних чинників: числа отворів (n), діаметра отвору (d), висоти сітки (h) і ступеня перекриття екраном сіткових отворів (s) (б).

анода, відносяться кількість отворів в сітці (n), їх діаметр (d), висота проміжку між сіткою і розміщеною над нею діафрагмою (h), ступінь перекриття (s) діафрагмою зовнішнього краю отвору в сітці і товщина сітки Δ . При збільшенні

n , d і h час формування основного розряду скорочується, а при збільшенні s – збільшується.

3.1. Втрати потужності в тиратроні.

Електрична потужність, яка в тиратроні переходить в тепло поступає за трьома каналами: з ланки анодного живлення, ланки нагрівання катода та ланки керування роботою сітки.

Верхня межа допустимої температури оксидного катода в гідрогенних тиратронах знаходиться в межах 820 – 850 С, а нижня 720-760 С. Додаткова потужність, що передається катоду і перетворюється в тепло, задається наступним виразом:

$$P_{\text{дод}} = I_A^2 R + I_i (\Delta U_K + U_i - \phi) - I_E \phi, \quad (19)$$

де $I_A^2 R$ – джоулеві втрати потужності в оксидному шарі, другий член цієї формули - це потужність, що передається катоду іонами в вигляді кінетичної енергії та енергії нейтралізації $I_i (U_i - \phi)$. Член $I_E \phi$ – це потужність, яка втрачається катодом в процесі емісії електронів.

Додаткове нагрівання катода розрядом не повинно переважати 100-120 С.

Потужність, що втрачається на керування роботою тиратрона визначається безпосередньо як графічний добуток напруги на сітці на сітковий

струм. Потужність, яка витрачається під час розряду, складається з втрат на старті і втрат в період, який встановився після старту.

Якщо в якості накопичувача енергії в схемі модулятора використовують відрізок коаксіального кабеля і зростання анодного струму в стартовий період визначається експонентою з постійною часу τ , то стартові втрати потужності тиратрона складають:

$$P_{a.н.} = \frac{1}{2} A \tau^2 (\tau + L_p/R_0), \quad (20)$$

де $A = F E_{am} I_{am}$ – фактор потужності, L_p – індуктивність розрядного кола, отримана з врахуванням індуктивності анодного і сіткового ввідів тиратрона, $R_0 = R_H + z$ – сумарний опір в анодному колі, F – частота, E_{am} – максимальна анодна напруга.

Ємнісна складова струму, яка зумовлена наявністю паразитної ємності тиратрона (C_{Π}), збільшує стартові втрати потужності тиратрона на величину:

$$P(C)_{CT} = 1,3 C_{\Pi} E_{am}^2 I_a f \quad (21)$$

де f – частота коливального контура, I_a – середній анодний струм, а відношення $f/F = I_{am} (2,65 I_a)^{-1}$.

Стартові втрати потужності тиратрона при роботі в якості ключа в високочастотному генераторі наступні:

	$f_1 = 440 \text{ кГц}$	$f_2 = 1760 \text{ кГц}$
$P(C)_{\text{СТ}}$	1,9 відн. од.	7,6
$P_{\text{КОМ. МАКС}}$	0,48	7,7
$P_{\text{СУМ.}}$	2,38	15,3

Потужність, яка втрачається в тиратроні коли розряд уже встановився:

$$P_A = F \Delta U_A I_{\text{ам}} t_i \quad (22)$$

де імпульс має прямокутну форму, струм $I_{\text{ам}}$ – незмінний на протязі імпульсу напруги ΔU_A тривалості t_i . Зв'язок між ΔU_A та $I_{\text{ам}}$ задається імпульсною ВАХ тиратрона.

Втрати потужності в тиратроні в післярозрядний період мають місце, коли на електродах тиратрона з'являється від'ємна напруга.

3.2. Відновлення сіткового запирання і електричної міцності імпульсного гідрогенного тиратрона

В процесі горіння розряду сітка тиратрона оточена іонною оболонкою. При довільній полярності напруги, що введена в коло сітки, її потенціал по відношенню до плазми розряду завжди негативний. Тому сітка тиратрона завжди оточена тонкою іонною оболонкою. При цьому, поле сітки завжди є заекранованим іонами оболонки і воно не може впливати на хід розвитку розряду в отворах сітки. В цьому і заключається відмінність в функціях сітки в іонних приладах від дії сітки в електронних приладах, де вона зберігає повну керованість у всіх робочих режимах. Оскільки після згасання розряду заряди в проміжку і в отворах сітки тиратрона зникають не відразу, як лише в процесі деіонізації, то й іонна оболонка зберігається в деякий кінцевий проміжок часу і після згасання розряду.

Час, який необхідний для того, щоб сітка тиратрона після гасіння розряду відновила свої запираючі властивості, називається ***часом відновлення прямої електричної міцності тиратрона.***

На рис.19. наведена типова крива відновлення міцності гідрогенного тиратрона, яка має три ділянки I, II та III. Майже горизонтальна ділянка I тривалістю Q_0 відповідає інтервалу часу на протязі якого на аноді не може бути підвищена напруга більша ніж напруга горіння розряду ΔU_a , без того щоб в тиратроні не виник повторний розряд. На протязі часу Q_0 сітка бездіє, бо товщина іонних оболонок хоча і збільшується, але залишається меншою радіуса отворів сітки, в зв'язку з чим між оболонками залишаються ділянки плазми, які виконують роль провідних каналів для анодного струму. Лише після часу Q_0

іонні оболонки в отворах сітки наближаються до дотику між собою, і це є передумовою до появи негативного поля сітки в сіткових отворах.

Початку збільшення в часі негативного поля на електрони, коли вони проходять через сіткові отвори, відповідає ділянка II. Швидке відновлення сіткового запирання на цій ділянці визначається тривалістю Q_1 , що відповідає зменшенню концентрації іонів в оболонках внаслідок рекомбінації зарядів на стінках.

На кінцевій ділянці III кривої відновлення сіткового запирання, яка є більш пологою, наявність іонів в сіткових отворах підтримується переважно за

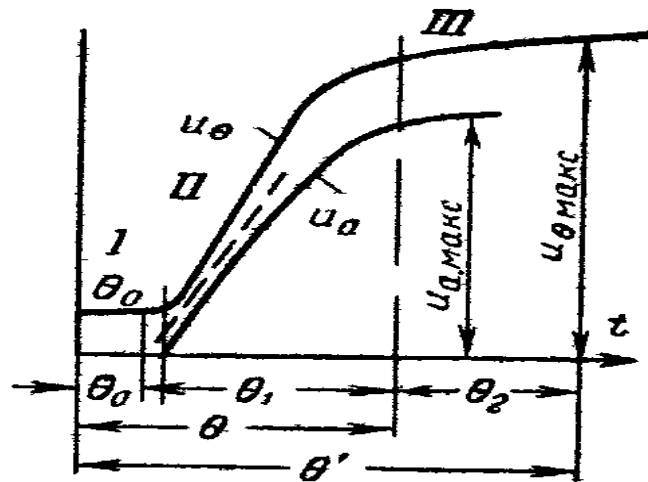


Рис.19. Співставлення кривої відновлення запірної напруги з фактичною напругою на аноді тиратрона.

рахунок їх приходу із сусідніх об'ємів, де деіонізація відбувається повільніше за рахунок значного віддалення від стінок (тривалість періоду III – Q_2).

Тривалості Q_1 і Q_2 залежать не лише від геометричної конфігурації анодно-сіткового вузла, розмірів та форми сіткових отворів, а й від величини анодного струму. Вони визначаються зазвичай експериментально.

Про збільшення в часі кривих відновлення електричної міцності на ділянках Q_1 , Q_2 в гідрогенних тиратронах можливо судити за даними рис.20.

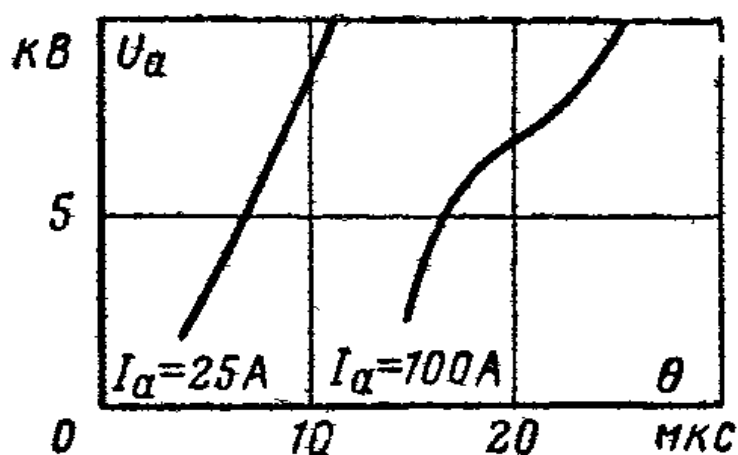


Рис.20. Криві відновлення електричної міцності гідрогенного тиратрона ТГИ I – 1000/25.

Менші часи відновлення прямої електричної міцності гідрогенних тиратронів в порівнянні з тиратронами, які заповнені інертними газами, є їх суттєвою перевагою.

Пошук шляхів, як з допомогою сітки не лише керувати моментом запалювання розряду, але і переривати розряд, привели до розробки гідрогенних тиратронів нового типу, які були навані *таситронами*. По своїй будові таситрони відрізняються від тиратронів лише тим, що у них сітка

виготовлена з дуже малою проникністю, а катод розрахований на великі струми емісії.

Поєднання великого запасу емісійного струму I_e по відношенню до анодного струму і зменшення проникності сітки досягається можливість не лише гасіння розряду, але і значного збільшення частоти імпульсів. Діаграми, що наведені на рис.21, ілюструють фізичні передумови для цього.

В тиратроні підвищення потенціалу при запаленому розряді починається в безпосередній близькості від катода, куди проникає плазма розряду. В тиситроні додатний потенціал починається поблизу сітки і охоплює її.

Передаючи сітці таситрона навіть помірний негативний потенціал створюють, таки чином, можливість переривання руху зарядів через сіткові отвори в області “сітка-анод”. Це відповідає за гасіння розряду і розширює керуючі властивості сітки таситрона в порівнянні з тиратроном, де сітка дозволяє лише встановити момент запалювання дуги.

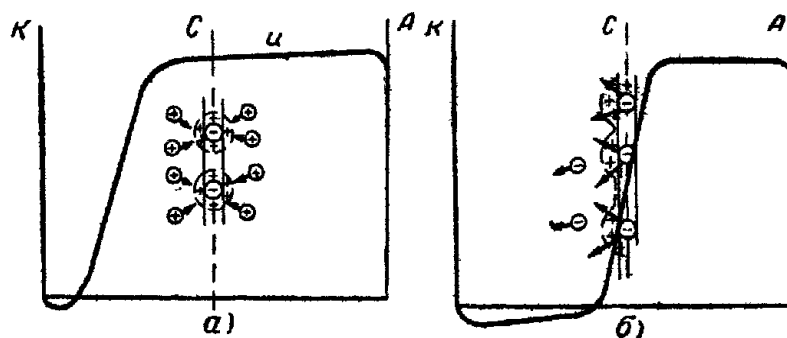


Рис.21. Криві розподілу потенціалу і плазмовий шар в тиратроні (а) і тиситроні (б).

Робочі частоти таситронів на порядок вищі ніж в тиратронах.

3.3.Параметри, конструкторська та режими роботи найбільш вживаних імпульсних гідрогенних тиратронів

На рис.22. та 23 наведено схеми з'єднання електродів в найбільш уживаних імпульсних гідрогенних тиратронів.

Позначення виводів на рис.22 наступні: А – анод, С – сітка, КП – катод, підігрівач катода, генератор гідрогена, П – підігрівач катода, генератор гідрогену.

На рис.23 введені такі позначення: А – анод, С – сітка, КП – катод, підігрівач катода та генератора гідрогену, 1 – вільний вивід, який не можна ні заземляти, ні з'єднувати з іншими виводами цього тиратрона, 2 – генератор гідрогена, 3 – підігрівач катода.

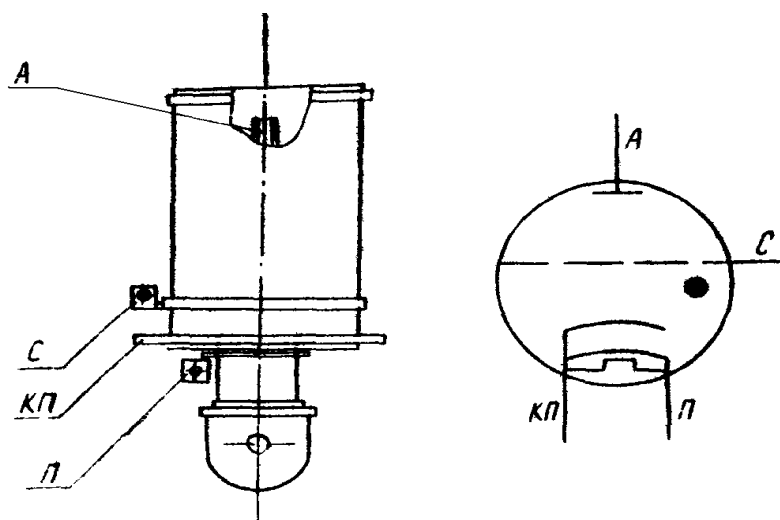


Рис.21. Схема з'єднання електродів з виводами для тиратрона ТГИ I

500/16.

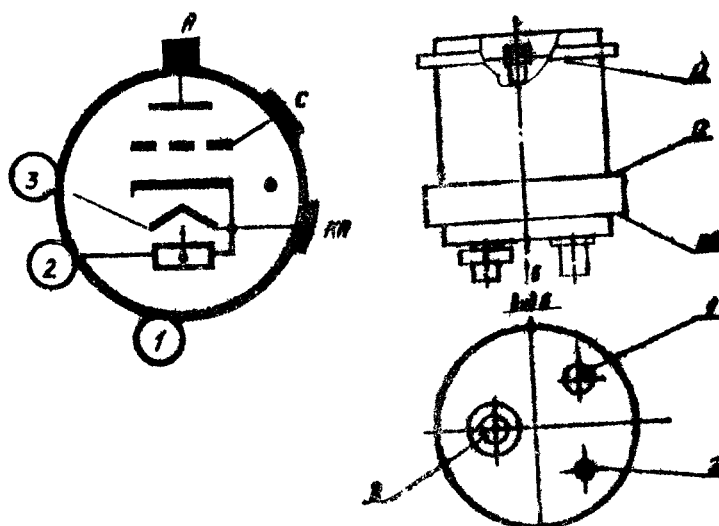


Рис. 23. Схема з'єднання електродів з виводами для тиратрона ТГИ I

1000/25.

Оболонка цих тиратронів складається з циліндричних керамічних кілець, які з'єдані з металевими фланцями, що виконують роль виводів від електродів, спеціальним вакуумним припоєм. Подвійна керувальна сітка тиратрона ТГИ І 1000/25 (Рис.23) виготовлена з двох дисків з отворами по периметру. Знизу сітка закрита диском з великим центральним отвором. Зазор між сіткою диском строго нормований. Це забезпечує зниженню проникності сітки до такого ступеню, що і при прямій анодній напрузі 25 кВ сітка зберігає додатну

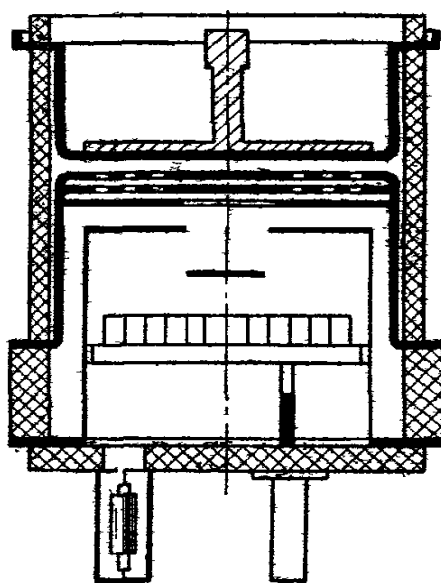


Рис.24. Конструкція металокерамічного гідрогенного тиратрона ТГИ І 1000/25.

характеристику. З другої сторони – достатньо великий переріз для струмопровідних каналів, які дозволяють пропускати імпульси струму більші

або рівні 1000 ампер при помірних значеннях прямого спаду напруги на тиратроні ($V = 80-100 \text{ В}$).

Добре розвинуті і близько розміщені поверхні в анодно-сітковому вузлі забезпечують при наявності гідрогену швидку рекомбінацію залишкових зарядів і тим самим високу частоту імпульсів струму, яку може пропускати відповідний пристрій.

За умовами деіонізації плазми в тиратроні, частота слідування імпульсів може досягати 50 кГц, але ця частота може досягатися лише при максимальному струмі тиратрона, оскільки, при цьому, внутрішні втрати потужності (переважно стартові втрати) будуть переважати максимально допустимі температури нагрівання тиратрона.

На рис.254. наведені залежності допустимої середньої (P_a) та імпульсної (P_i) потужності, а також допустимого чинника потужності A від частоти для тиратрона ТГИ I-1000/25. Виконання потужних імпульсних тиратронів з металокерамічною оболонкою забезпечує підвищення механічної і теплової стійкості пристрою. Більш високі температури, які допустимі для кераміки, дозволяють значно зменшити габарити тиратрона.

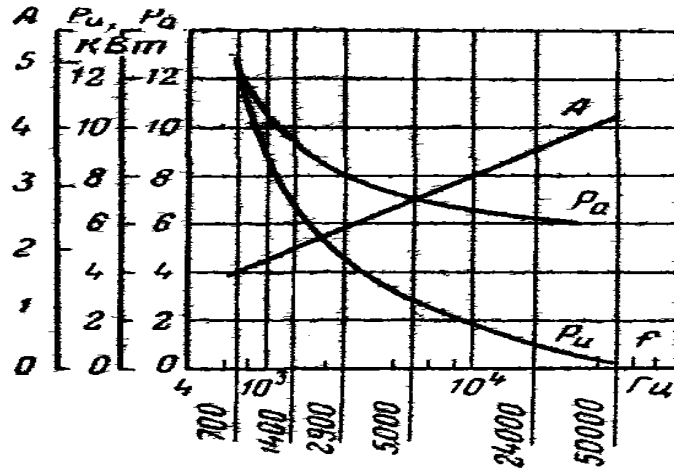


Рис.25. Залежність середньої (P_a), імпульсної (P_i) та чинника потужності від частоти слідування імпульсів для тиратрона ТГИ I - 1000/25.

Розглянемо основні умови експлуатації та порядок вмикання металокерамічних гідрогенних тиратронів (на прикладі тиратрона ТГИ I - 500/16).

Цей тиратрон кріпиться до металевої панелі за фланцевий вивід катода і підігрівача чотирма гвинтиками М4 з використанням прижимного металевого кільця. Панель кріплення може бути частиною шасі модулятора висовольтних імпульсів. При мінімальній площі обох сторін панелі 300 см^2 забезпечується нормальний тепловий режим роботи тиратрона в умовах природного охолодження при довільному положенні тиратрона. Температура електродів та панелі, при цьому, не буде переважати 250 C . Матеріал панелі повинем мати антикорозійні властивості.

Провід до анодного вивода приєднується з допомогою стержня або двох гайок М8 (вібростійке з'єднання), а до виводів підігрівача та сітки – гвинтами – М4. Ці провідники повинні бути гнкими і не повинні створювати статичних або динамічних навантажень на виводи тиратрона.

При підмиканні анода короткочані статичні навантаження не мають переважати 98 Н (10 кгс) подовж осі тиратрона та 19,6 Н (2 кгс) перпендикулярно осі тиратрона.

Вмикання напруг живлення проводять в наступній послідовності: спочатку вмикають напругу розжарення катода і напругу сітки та витримують на проязі часу розігрівання катода, потім подають напругу на анод. Допускається підмикання напруги на сітку безпосередньо перед вмиканням анодної напруги. Подавання напруги на анод здійснюється одноступенево при умові, що напруга на аноді за рахунок перехідних процесів в джерелі живлення в момент вмикання не буде перевищувати 16 кВ. При вимиканні напруг живлення тиратрона в першу чергу відмикається анодна напруга, опіся цього, в довільній послідовності напруга на сітці і напруга розжарення катода.

Необхідною умовою експлуатації тиратрона є 5 % неузгодження опору навантаження і хвильового опору лінії. Допускається 20 % неузгодження, але, значне неузгодження приводить до збільшення втрат в тиратроні і скороченню його ресурсу роботи.

Для захисту джерела імпульсної напруги (амплітудою 25 кВ, тривалістю імпульсів до 0,1 мкс), яке формується в період запалювання тиратрона,

рекомендується в колі сітки вмикати “П” – подібний фільтр з параметрами $L_{\Phi} =$ мкГн, $C_{\Phi} = 100-300$ пФ.

Для забезпечення стійкої роботи тиратрона при частоті повторення імпульсів > 500 Гц необхідно подати від’ємну напругу на сітку 10-50 В після проходження імпульсу анодного струму (напруга формується джерелом постійного струму, або за рахунок заряджання розділового конденсатора).

Робоче положення тиратрона може бути довільним.

Для тиратрона ТГИ I 500/16 допускається робота при частоті повторення імпульсів до 50 кГц, при умові зниження імпульсної та середньої потужності. При цьому, робота тиратрона ТГИ I 500/16 можлива в наступному режимі: напруга анда , пряма, - 12 кВ; струм анода в імпульсі – 250 А; струм анода середній – 0,5 А; тривалість імпульса аноду, 0,5 мкс; частота повторення імпульсів 4 кГц. На протязі перших 15 сек після подання напруги на анод тиратрона допускається не більше ніж 5 зривів імпульсної роботи.

Для більш потужного тиратрона ТГИ I – 1000/25 високочастотний режим роботи досягається при наступних умовах.

Пряма напруга на аноді < 12 кВ; струм аноду в імпульсі < 70 А, середній анодний струм < 1 А, тривалість імпульсу анодного струму $< 0,3$ мкс, максимальна частота повторення – 50 кГц.

При форсованому режимі розігрівання тиратрона ТГИ I - 1000/25 напруга розжарення катода і генератора гідрогену повинна складати 8,0 В і витримуватися не менше 2 хвилин, після чого зменшують напругу розжарення

до 6,3 В і витримують в часі не менше ніж 1 хвилину. Анод цього тиратрона повинен обдуватися повітрям з розходом не меншим за 30 м³ в годину. По закінченні експлуатації або при виході тиратрона з ладу раніш ніж за 750 годин його необхідно повернути на підприємство де він був виготовлений з повідомленням дат вмикання та вимикання і умов роботи (схеми та режиму роботи), а також причини зняття з експлуатації.

При експлуатації цих гідрогенних тиратронів *не допускається* відхилення від максимально допустимих параметрів, які наводяться нижче.

	ТГИ I – 500/16		ТГИ I – 1000/25	
	(не менше не більше)		(не менше не більше)	
- Струм аанада в імпульсі, А	15	500	-	1000
- Струм аанада середній, А	-	0,5	-	1
- Струм сітки в імпульсі, А	2,5	15	3	-
- Напруга на аноді, пряма, кВ	3	16	5	25
- Напруга на аноді, зворотня, за рахунок неузгодження хвильового опору формуючої лінії з опором навантаження, кВ	0,8	3,2	1,3	5
- Напруга розжарення, В	6,0	6,6	6,0	6,6
- Напруга на сітці в імпульсі, В	400	1000	500	-

- Крутість фронту імпульсу струму анода, А/мкс	-	2000	-	4000
- Крутість фронту імпульсу струму сітки, А/мкс	1000	2500	1500	2500
- Частота повторення імпульсів, кГц	-	50	-	50
- Тривалість імпульса струму анода, мкс	0.5	10	-	50
- Тривалість імпульса напруги сітки, мкс	3	7	3	7
- Час розжарення катода, хвил.	5	-	5	-

4. Резистори високовольтних наносекундних пристроїв

Резистори високовольтних пристроїв з імпульсами короткої тривалості повинні задовільняти ряду вимог. Їх опір не повинен залежати від напруги і частоти в інтервалі U і f імпульсів, які використовуються. Такі резистори повинні бути термічно стабільними і мати малу паразитну індуктивність і ємність. Найбільш доцільно використовувати плівкові, металоплівкові та

композиційні опори. Працювати з провідниковими (виготовленими з дроту) резисторами неможливо, внаслідок значної паразитної індуктивності та поверхневого ефекту. Характеристикою поверхневого ефекту є глибина проникнення струму в провідник (δ), на якій густина струму в $e = 2,72$ рази менша за густину струму біля поверхні провідника.

$$\delta = (\pi \mu f \sigma)^{-1/2}, \quad (23)$$

де: f – частота [Гц], $\mu = \mu_0 \mu_r$ – абсолютна магнітна проникність провідника, σ – питома провідність [Ом/м].

Якщо для f_{MAX} (де $f_{\text{MAX}} = 0,4/t_{\text{ФР}}$ для прямокутного імпульсу з тривалістю фронту $t_{\text{ФР}}$ – максимум частоти в спектрі імпульсу), то опір з товщиною провідного шару Δ та заданими μ і σ не буде залежати від частоти при $\Delta/\delta < 0,1$. Наприклад, при використанні мідного опору для передачі імпульсів з тривалістю фронту 10 нс δ становить приблизно 10 мкм, тому провідні плівки з міді повинні мати товщину декілька мікрометрів.

При дії на резистор імпульсів з складовими частотами $f > 10^7$ Гц важливим є вплив власної ємності та індуктивності опорів. Погонні параметри L_0 і C_0 визначаються коефіцієнтом форми резистора (наприклад, коли він має циліндричну форму):

$$K_{\Phi} = 1/(\pi D), \quad (24)$$

де l – довжина, а D – діаметр резистора. Погонні параметри резисторів визначаються з наступних співвідношень:

$$C_0 = (10^{0,8/K_\Phi})^{-2} \text{ пФ/см}; \quad L_0 = 2[\ln 4\pi K_\Phi - 1] \text{ нГн/см}, \quad (25)$$

Для резисторів з опором $R > (L_0/C_0)^{1/2}$ де $[L_0] - [\text{Гн}]$, $[C_0] - [\text{Ф}]$, то впливом індуктивності можна знехтувати і схему заміщення резистора можливо представити в вигляді паралельної RC – ланки (де $C = C_0 l$; l – довжина провідника). При $R < (L_0/C_0)^{1/2}$ нехтують впливом ємності C_0 , а схему заміщення резистора представляють послідовною LC – ланкою ($L = L_0 l$).

Опір резистора при високій напрузі залежить від напруги (він зменшується з її збільшенням). Основною причиною нелінійності опору є локальні перегріву провідної плівки, які зумовлені нерівномірним розподілом струму в об'ємі резистора.

Максимально допустима робоча напруга обмежується пробоем по поверхні резистора. При заданому тиску (p) вона залежить від віддалі між выводами l :

$$U_{\text{ПР}} = 300 (7600 p l)^{1/2}, \quad (26)$$

де: $[p]$ – МПа, $[l]$ – см. $p \geq 2 \cdot 10^{-4}$ МПа см і $T = 300$ К при тривалості імпульсів порядку 1 мкс. Якщо ж $T > 300$ К, то в дужках формули (26) вводиться множник $300/T$.

В таблиці 1 приведені основні параметри деяких високовольтних резисторів циліндричної форми з вуглецевим покриттям.

Крім цих резисторів розроблені також циліндричні високовольтні й височастотні резистори типу МОУ. У них використовується легований двоокис олова, який отримується методом хімічного осадження. Ці резистивні плівки відрізняються значною хімічною стійкістю і можуть використовуватися до температури 200 С. В таблиці 2. наведено їх основні параметри.

Таблиця.1.

Тип	Номінальна Потужність, Вт	Довжина, см	Діаметр, мм	Опір, Ом	Максим. напруга, при $t_i = 1$ мкс, В	Макс. потуж. в імп., кВт
УНУ -10	10	12	24	50; 75	4000	212
УНУ 25	25	18	28	50; 75	6500	570
УНУ	50	25	44	50; 75	8700	1000

50						
УНУ – 100	100	35	65	75	12500	2000

Таблиця 2

Тип	Номінальна потужність, Вт	Довжина, см	Діаметр, см	Опір, Ом	Максима льна напруга, В
МОУ-10	10	8	0,8	10-150	3200
МОУ-25	25	18	1,8	17-75	7200
МОУ-100	100	30	2,1	17-75	17500
МОУ-200	200	30	2,1	17-75	17500

5. Високовольтні імпульсні конденсатори

Ідеальний конденсатор в колі змінного струму забезпечує випередження на 90° ємнісного струму по відношенню до напруги на цьому конденсаторі. Реальний конденсатор є досить складним сполученням опору (R), індуктивності (L) і ємності; тому для оцінки якості конденсаторів вводять

величину $\operatorname{tg}\delta$ (де кут δ доповнює кут зміщення фаз між струмом і напругою до 90°).

Струм ідеального конденсатора $I = CU\omega$, а втрати енергії відсутні. Потужність втрат у реальному конденсаторі $P = UI\sin\delta$. Схема заміщення і діаграми струмів та напруг в реальному конденсаторі наведені на рис.26.

Якщо активні втрати в резисторі R більші ніж в “ r ”, то вибирається схема заміщення з паралельним сполученням R і C при $r = 0$. Коли ж втрати в “ r ” вищі ніж в “ R ”, то вибирається схема заміщення з послідовним сполученням C та r (при $R = \infty$). В залежності від схеми заміщення змінюється і еквівалентна ємність. При цьому, $C_{\text{ПАР}} = C_{\text{ПОС}}/(1 + \operatorname{tg}^2\delta)$.

Номинальне значення ємності, що наведене в паспорті на імпульсний конденсатор відповідає послідовній схемі заміщення. Оскільки вигляд схеми заміщення визначає передавальну характеристику конденсатора, то залежність $\operatorname{tg}\delta$ від частоти вказує, яка з простіших схем заміщення ближча до реальної.

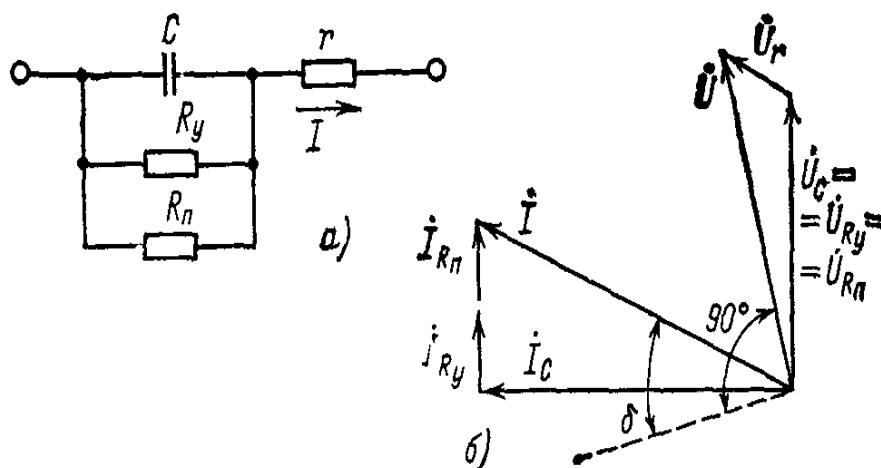


Рис.26. Схема заміщення (а) і векторна діаграма напруг конденсатора (б)
 де: r – опір обкладинок і виводів, R_y – опір втрат (витоку), R_n – опір,
 що зумовлений релаксаційною поляризацією (загальний опір $R = R_y$
 $R_n / (R_y + R_n)$).

Якщо $\text{tg} \delta$ при збільшенні частоти зменшується, то ближче паралельна схема, а якщо збільшується, то реальнішою є послідовна схема заміщення конденсатора. Коли $\text{tg} \delta$ слабо залежить від частоти, то діє схема, наведена на рис.26.

Значення опорів “ r ” і “ R ” залежать від частоти. На високих частотах суттєвим є вплив індуктивності конденсатора, яка зумовлена, в основному, наявністю розподіленої індуктивності його обкладинок. Тому до деякої визначеної (резонансної) частоти повний опір конденсатора зменшується, а потім збільшується, оскільки реактивна складова приймає індуктивний

характер і конденсатор перестає виконувати свою головну функцію. Резонансна частота досягає приблизно 2 ГГц для керамічних конденсаторів малої ємності. Резонансна же частота для конденсаторів з паперово-масляною ізоляцією знаходиться в межах від десятків до сотень кГц.

Досить універсальним методом визначення потужності втрат в конденсаторі при несинусоїдальній напрузі є сумування втрат при кожній гармоніці.

$$P_c = (\text{сума по } k) 2\pi U_{CK} f_k \operatorname{tg}\delta_k, \quad (27)$$

Для цього прикладену до конденсатора напругу розкладають в ряд Фур'є і визначають $\operatorname{tg}\delta$ для кожної гармоніки. Гармонічний ряд можна обмежити номером тієї гармоніки, четверта частина періоду якої рівна тривалості фронту імпульсу напруги на конденсаторі.

5.1. Характеристики і режими роботи імпульсних високовольтних конденсаторів

Робота конденсаторів при імпульсному навантаженні відрізняється тим, що напруга, яка підводиться до конденсатора, має різко відмінні за тривалістю ділянки: відносно тривалий фронт (заряд конденсатора) і дуже короткий спад (розряд конденсатора). При частоті повторення розрядних імпульсів порядку десятків кілогерц (сучасні імпульсні лазери, генератори електроерозійних

станків тощо) вимоги до високовольтних конденсаторів силових установок ще вищі, оскільки $\text{tg}\delta$ і пов'язане з цим нагрівання конденсатора стає основним обмежувальним чинником.

Для охолодження конденсаторів дуже важливим є їх розміщення, яке визначається конструкцією імпульсного генератора. Хороші результати дає використання паралельно з'єднаних імпульсних конденсаторів малої ємності, оскільки, проблема їх примусового охолодження вирішується простіше, ніж при використанні одного конденсатора великої ємності. В цьому випадку потік охолоджуючого повітря може рівномірно охолоджувати кожен з конденсаторів.

Основною вимогою до імпульсних конденсаторів високовольтних імпульсних пристроїв є мінімальна власна індуктивність і мінімальний об'єм обкладинок та діелектриків, щоб з'єднувальні провідники не вносили в розрядний контур великих індуктивностей.

Для отримання імпульсів великого струму в моноімпульсному режимі необхідні конденсатори великої ємності. З високовольтних конденсаторів найбільшу ємність мають конденсатори з паперово-масляною ізоляцією. Вони складаються з окремих секцій, які намотані в вигляду рулонів і сполучені між собою паралельно в окремі групи для збільшення загальної ємності (рис.27.). Ці групи з'єднані між собою послідовно для збільшення робочої напруги конденсатора.

Індуктивність обкладинок такого імпульсного конденсатора можна оцінити за формулою:

$$L_1 = 1/3 \mu_0 l_{\text{ЕКВ}} (2d_{\text{Ф}} + 3 d_{\text{С}})/b_{\text{В}}, \quad [Гн], \quad (28)$$

де: $b_{\text{В}}$ – ширина обкладинок фольги, $d_{\text{С}}$ – товщина діелектрика (віддаль між обкладинками конденсатора), $b_{\text{В}} \gg d_{\text{С}}$, $d_{\text{С}}$ – товщина обкладинок (фольги), $l_{\text{ЕКВ}}$ – еквівалентна довжина обкладинок [м], $b_{\text{Ф}} \gg d_{\text{Ф}}$.

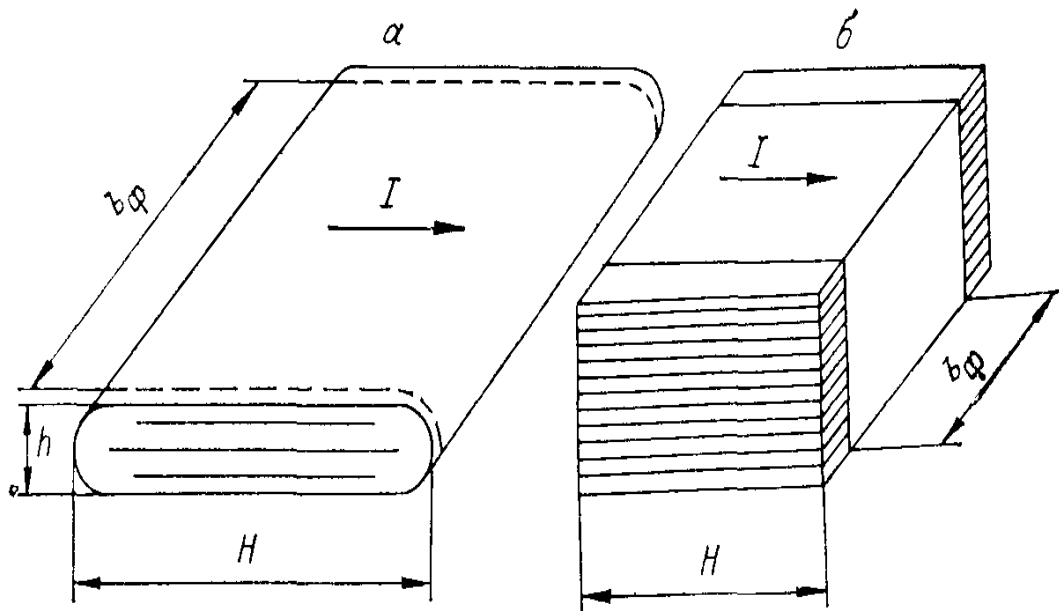


Рис. 27. Загальний вигляд рулонної секції (а) і пакета пластинчатих секцій (б)

Індуктивність виводів секції L_2 , які зазвичай виготовляють в вигляді мідних смуг і розміщують з одного торця, можна оцінити за наступними співвідношеннями:

$$L_2 = \mu_0 l_{\text{В}} \pi^{-1} (\ln D/b_{\text{В}} + 3/2), \quad (29)$$

$$L_2 = \mu_0 l_B \pi^{-1} (2 d_B + 3 a)/b_B. \quad (30)$$

де: b_B – ширина виводу конденсатора, l_B – довжина виводу [м], D – віддаль між осями виводів при їх горизонтальному розміщенні, a – віддаль між выводами при їх розміщенні один над другим d_B – товщина виводів. Формула (6) для горизонтального розміщення, формула (7) – для вертикального розміщення виводів один над другим. Власна індуктивність всієї секції L_C – визначається сумою $L_c = \frac{1}{2} L_1 + L_2$.

В таблиці 3. Наведені основні параметри деяких найбільш ушиваних високовольтних імпульсних конденсаторів. Вони можуть бути використані в генераторах імпульсів з амплітудоб в сотні кіловольт і вище.

Таблиця. 3.

Тип кон-ра	Робоча напруга, кВ	Ємність, мкФ	Енергія, яка запасається, Дж	Індуктивність, мкГн
СССР				
ИК 50-3	50	3	3750	0,04
ИКМ 50-3	50	3	3750	0,01
ИМГ 80-1	80	1	3200	0,40

ИМН 100- 0,1	100	0,1	500	0,20
ИК-100- 0,25	100	0,25	1250	0,15
ИК-100-0,4	100	0,40	2000	0,15
КМК 50-4	50	4	5000	0,015
КМК 100- 0,3	100	0,30	1500	0,008
КММ 150- 0,6	150	0,60	6750	0,40
КИМ-6М	20	15	3000	0,04
КИМ-14	50	4	5000	0.025
США				
ESC-248	20	15	3000	0,06
ESC-249	120	0,84	6000	0,09
ESC-249B	120	1,0	7200	0,09

ESC-250	120	0,84	6000	0,03
Англія				
CD-11148	100	0,625	3100	0,204

Малу індуктивність мають керамічні конденсатори бочкоподібної та дископодібної форми, які мають досить велику робочу ємність и знайши широке використання в квантовій електроніці. Основні їх характеристики наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Параметр	КВИ-3	К15У-1	К15-4	К15-5
Ємність, пФ	220-4700	470-10000	220-4700	70-15000
Робоча напруга, кВ	20-5	4,8-16	12-40	1,6-6,3
Висота, мм	20-14	14-27	38-65	4-7
Діаметр, мм	20-50	45-185	19-48	8-40
Маса, г	35-70	50-600	30-300	1,5-33

5.2.Старіння імпульсних конденсаторів

В більшості випадків вихід з ладу високовольтних конденсаторів пов'язаний з поступовим погіршенням властивостей діелектрика в умовах дії електричного поля з високою напруженістю, що завершується пробоем (процес електричного старіння).

В високовольтних конденсаторах з органічним діелектриком електричне старіння зумовлено дією часткових розрядів в повітряних і рідинних прошарках ізоляції. В ізоляції високовольтних конденсаторів з рідинним наповненням під дією часткових розрядів одночасно відбуваються два процеси: виділення газу з швидкістю $h_{г.р.}$ і поглинання газу з швидкістю h_t . Величини $h_{г.р.}$ і h_t визначаються за формулами:

$$h_{г.р.} = V_{г} P_{г.р.}; \quad h_t = \beta N_0 \exp(-t/\tau), \quad ()$$

де $V_{г}$ – питома газовиділення, $P_{г.р.}$ – потужність часткових розрядів, $N_0 = C_{г} V_{р}$ – максимальна кількість газу, яка може поглинутися всім об'ємом рідини в конденсаторі, β – константа газопоглинання, τ – стала часу газопоглинання. Доки швидкість поглинання газу переважає швидкість газовиділення, газ в рідині існує лише в молекулярно розчиненому вигляді, що не суттєво впливає на електричну міцність рідкого діелектрика, не змінює характеристики часткових розрядів, оскільки потужність $P_{г.р.}$ залишається незмінною. При $h_t < h_{г.р.}$ газ, що виділився, не встигає поглинутися рідиною і в об'ємі ізоляції формуються газові порожнини. Оскільки електрична міцність газу значно нижча від міцності рідини-діелектрика, то, при цьому, спостерігається

зниження напруги виникнення часткових розрядів і стрикоподібне (на декілька порядків) збільшення їх потужності. Це в свою чергу збільшує швидкість виділення газів, в результаті чого імпульсний високовольтний конденсатор швидко виходить з ладу. Рахується, що до моменту часу коли $h_t < h_{г.р.}$ діють початкові часткові розряди, а після досягнення цієї умови – критичні часткові розряди. Початкові часткові розряди несуттєво впливають на твердий діелектрик, тоді як під дією критичних часткових розрядів відбувається руйнування твердого діелектрика. Час, який необхідний для переходу від початкових до критичних часткових розрядів визначається співвідношенням:

$$t = (\beta H_0 - h_{г.р.}) / (\beta h_{г.р.}). \quad ()$$

Властивості, що характеризують стійкість рідких діелектриків до дії часткових розрядів, описуються коефіцієнтом газовиділення ($V_{г.}$) та напруженістю електричного поля, при якій виникають часткові розряди ($E_{г.р.}$). Результати порівняльної оцінки деяких рідких конденсаторних діелектриків наведені в таблиці 5.

Таблиця 5.

Рідкий діелектрик	$U_{н.}$, кВ	$I_{н.ч.р.}$, Кл/с	$V_{г.} 10^{-9}$, м ³ /Дж
Полібутен	9,5	$1 \cdot 10^{-8}$	

Діоктілфталат	2,5	$8 \cdot 10^{-10}$	
Додецілбензол	17,5	$8 \cdot 10^{-10}$	
Фенилксілілетан	21,5	$2 \cdot 10^{-10}$	

З таблиці 5 випливає, що максимальну стійкість до часткових розрядів має фенилксілілетан, а мінімальну – полібутен.

Інтенсивність часткових розрядів залежить від параметрів імпульсного режиму, в першу чергу, від декремента коливань в розрядному контурі. Декремент коливань сильно впливає на довговічність імпульсних конденсаторів, оскільки ним визначається зворотня напруга на конденсаторі і розмах напруги на ньому. Ці чинники і визначають енергію часткових розрядів за один період діючої напруги. При коливальному затухаючому режимі розрядження конденсатора часткові розряди повинні мати місце в ряді півхвиль, проте, враховуючи сильну залежність інтенсивності часткових розрядів від напруги, при, декрементах коливання більших за 1,5 до уваги приймають лише першу пряму і зворотню півхвилі напруги. Інтенсивність часткових розрядів залежить також від частоти затухаючих коливань, а при відсутності коливань - від тривалості імпульса розрядного струму. Ароматичні та хлорвмісні вуглеводні сполуки в порівнянні з іншими мають мале газовиділення і високу здатність поглинати гідроген та інші леткі продукти. Під дією часткових розрядів в цих діелектриках виділяється сажа, а в хлормісних

рідинах також виділяється хлорид гідрогена (HCl). Термін служби ізоляції конденсатора визначається збільшенням $\tan\delta$, що пов'язано з змінами властивостей твердої ізоляції при хімічній взаємодії твердої ізоляції з продуктами розкладу. Руйнування твердого діелектрика, який насичений ароматичними або хлорвмісними рідинами відбувається значно повільніше, ніж руйнування діелектрика насиченого нафтовим маслом. Основна причина цього зумовлена тим, що вуглець, який виділяється в процесі руйнування ароматичних рідин, шунтує часткові розряди і гасить їх. Для режиму критичних розрядів термін служби конденсаторів просичених хлордифенілом, в три рази вищий, ніж у конденсаторів, просичених маслом. Це відбувається внаслідок перерозподілу напруженості електричного поля між твердим діелектриком і рідиною-діелектриком (у хлордифеніла висока діелектрична здатність) і високою стійкістю цього рідкого діелектрика до часткових розрядів.

В металопаперових і металоплівкових конденсаторах в якості електродів використовують шари металів (цинку або алюмінію) товщиною 0,03-0,05 мкм, які напилені на основний або допоміжний діелектрик. Внаслідок малої товщини і порвняно високої активності під впливом вологи і забруднення електродів відбувається корозійне електрохімічне руйнування електродів. Це приводить до зменшення площі електродів і ємності імпульсного конденсатора.

Електричне старіння титановмісних та інших керамічних конденсаторних матеріалів найбільш інтенсивно відбувається в постійному електричному полі

при підвищеній температурі. З плином часу старіння кераміки спостерігаються наступні стадії зміни густини струму (або електропровідності): на першій – густина струму зберігає постійне значення або трохи зменшується; на другій – відбувається швидке зростання густини струму за степеневим законом ($j = A t^n$, де A , n – константи, що не залежать від часу; на четвертій стадії струм різко збільшується і процес старіння кераміки завершується пробоем. Збільшення струму на другій стадії старіння супроводжується пофарбуванням зразків кераміки. Хмаринка зафарблення поширюється від катода (кераміка TiO_2), або від анода (кераміка $BaTiO_3$) і зумовлена появою центрів зафарблення, які відіграють роль донорів чи акцепторів і забезпечують таким чином додаткові електронну або діркову провідність зразка.

Вихід з ладу керамічних конденсаторів зумовлений також зміною їх параметрів. Наприклад, у конденсаторів з кераміки $BaTiO_3$ опір ізоляції через 100 годин зменшується приблизно на порядок. Пробій цих конденсаторів на змінній напрузі викликаний також нерівномірним розігріванням ізоляції і пов'язаний з дією часткових розрядів в порах або з наявністю дефектів. Найбільш небезпечними є газові пори розміром від десятих долей міліметра.

6. Імпульсна електрична міцність газових проміжків

При розробці високовольтних пристроїв з короткочасною дією високої напруги особливе значення має вибір основних ізоляційних віддалей. В цьому параграфі розглянемо найбільш загальні співвідношення, які дозволяють

наближено розраховувати ізоляційні газові проміжки у високовольтних пристроях.

Відомо, що при збільшенні неоднорідності електричного поля (наприклад, при зменшенні радіуса вістря в проміжку “вістря – площина”) пробивна напруга знижується, як і при збільшенні інтенсивності опромінення проміжка. Аналогічні ж закономірності мають місце і при імпульсному пробої газових проміжків, але вони ускладнюються статистичним характером утворення первинних вільних електронів. Щоб конкретний проміжок в деякому газі при прикладанні імпульсу заданої форми, амплітуди і тривалості не пробивався, час формування розряду в цих умовах повинен бути не меншим тривалості імпульсу. Стастичний характер утворення вільних електронів тільки збільшує надійність газового проміжку, оскільки потребує для розвитку пробою додаткового часу дії напруги.

Основним критерієм пробою є досягнення в деякій точці міжелектродного проміжку плазмою критичного значення заряджених частинок $n_{кр}$. Якщо врахувати, що електрони в проміжку народжуються в процесі розвитку лавини, радіус якої $r_{лк}$ практично постійний на протязі більшого часу її розвитку, тоді $n_{кр}$ наближено дорівнює $N_{кр}/(4/3 \pi r_{лк}^3)$, де $N_{кр}$ – число електронів в лавині з критичною густиною зарядів. Нехтуючи зміною радіуса лавини за рахунок меншого часу її розвитку τ , тобто допускаючи, що $r_{лк}$ наближено рівний радіусу розвинутої до критичної концентрації електронів лавини ($\tau_{лт}$), одержимо:

$$n_{\text{кр}} = n_{\text{н}} \exp(\alpha v \cdot x), \quad ()$$

де α – коефіцієнт ударної іонізації Таунсенда, v – швидкість дрейфу електронів, $n_{\text{н}}$ – початкова густина електронів в проміжку. Якщо не враховувати втрати електронів за рахунок прилипання в електронегативних газах і виходити з високочастотного механізму, то можна одержати формулу для часу формування розряду:

$$p \tau = \ln n_{\text{кр}}/n_{\text{н}} (v \cdot \alpha/p)^{-1}, \quad ()$$

де p – тиск газу. З останнього співвідношення випливає наступне:

- час формування розряду τ зменшується приблизно за логарифмічним законом від інтенсивності опромінення ω (бо $n_{\text{н}}$ пропорційне ω);
- добуток тиску газу на час формування розряду залежить від відношення пробивної напруженості до тиску (E/p), оскільки $v = v(E/p)$ і $\alpha/p = \alpha/p(E/p)$; емпіричні залежності $p \tau = f(E/p)$ для різних газів (рис.28) якісно підтвержують співвідношення ().

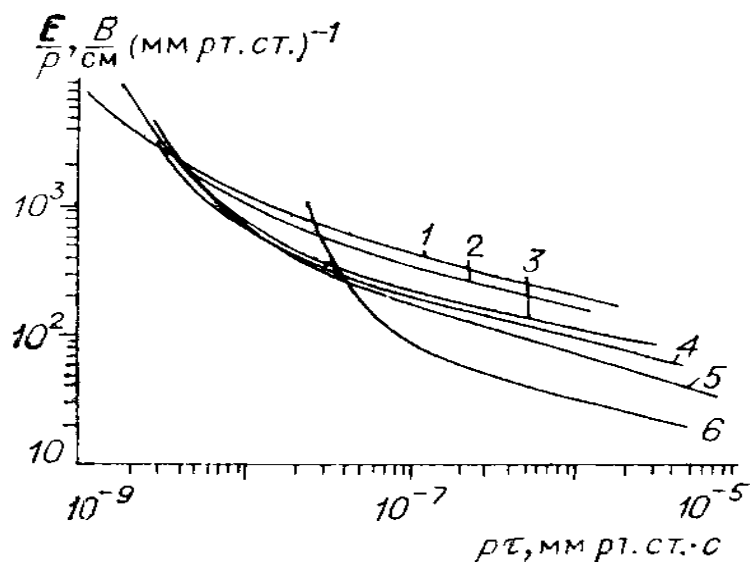


Рис.28. Залежність добутку часу формування на тиск ($p \tau$) від приведеної імпульсної пробивної напруженості електричного поля (E/p) для різних газів (1 - 6 відповідно фреон – 12, елегаз, азот, повітря, аргон та гелій).

Для широкого діапазону тисків і зазорів отримано наступні емпіричні залежності для імпульсної електричної міцності газових проміжків:

$$E(+)(d t_{\text{eff}})^{1/6} = k(+)(-)\ p^n, \quad ()$$

де: p – тиск газу в [0,1 МПа], $E = U_{\text{П}}/d$, $U_{\text{П}}$ – напруга пробою в [кВ], t_{eff} – час, за який напруга досягає $0,89 U_{\text{П}}$ [мкс], $k(+)$, n – постійні коефіцієнти. Для повітря було одержано, $k(+)=k(-)=22$, $n=0,6$; для фреона $k(+)=36$, $k(-)=60$, $n=0,4$; для елегазу $k(+)=44$, $k(-)=72$, $n=0,4$.

Тиск газу знаходиться в межах 0,1 – 0,5 МПа, а напруга до 1 МВ, час дії напруги змінюється в межах від 0,1 до 10 мкс. В останній формулі знаки при Е та k відповідають полярності електрода з більш сильним електричним полем, а імпульс напруги був за формою лінійнозростаючим. Коли ж імпульс напруги прямокутний, то U_{Π} – амплітуда імпульсу, а t_{eff} – його тривалість.

7. Імпульсні трансформатори для високовольтних наносекундних пристроїв

За останні роки інтенсивно розвинулися застосування коротких електричних імпульсів високої напруги в фізичних експериментах та імпульсних технологіях. У зв'язку з розширенням діапазону навантаження стало вигідним використовувати додатково до звичайних генераторів імпульсів і імпульсні трансформатори (ІТ). Проте звичайні ІТ мікросекундного діапазону тут, як правило, використати не можливо внаслідок сильного впливу паразитних параметрів L і C та високочастотних властивостей магнітних матеріалів сердечника ІТ на параметри трансформованих імпульсів.

Для розширення області роботи наносекундних генераторів з тиратронним та іскровими комутаторами на навантаження 1 Ом і менше та сотні Ом і більше можливим є використання наступних типів ІТ.

а). Імпульсний трансформатор на відрізках однорідних ліній довгих ліній.

Принципова схема такого ІТ наведена на рис.29. Тут декілька ліній однакової електричної довжини для збільшення напруги генератора імпульсів на вході з'єднуються паралельно, а на виході послідовно. Якщо на виході ввімкнути навантаження $R_H = N \rho$ (де ρ – хвильовий опір окремої лінії), то в навантаженні амплітуда напруги при ідеальних умовах зростає в N – разів в порівнянні з напругою на виході. Основною перевагою ІЕ на відрізках довгих ліній є досить рівномірний розподіл напруги по лініям на виході схеми і малі значення паразитних параметрів. Це дозволяє трансформувати з малим спотворенням імпульси тривалістю в декілька наносекунд і напругою в сотні кіловольт. При роботі з навантаженням прядку 1 Ом (і менше) використовують звороне вмикання ІЕ. Основний недолік цих ІТ в порівняно невеликому коефіцієнті трансформації і сильному спотворенні імпульсів, яке залежить від будови ІТ.

б). Імпульсні трансформатори з біфілярною обмоткою (кабельні ІТ)

Для зменшення паразитної індуктивності L в ІТ з феритовим сердечником

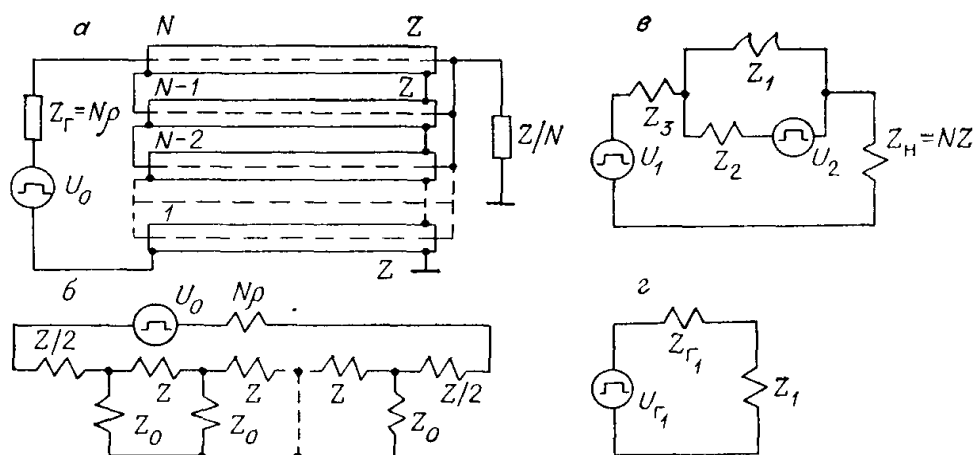


Рис.29. Принципова схема імпульсного трансформатора на відрізках ліній.

запропоновано використовувати обмотки з коаксіального кабеля. Ці обмотки складаються з трьох відрізків. Початки і кінці оплётки відрізків кабеля з'єднані паралельно і утворюють первинну обмотку ІТ. Коефіцієнт трансформації кабельного ІТ дорівнює числу відрізків $N = 3$ (Рис.30.). Для збільшення індуктивності намагнічування, як і в звичайних ІТ, відрізки кабеля намотують на феритовий сердечник. Висока імпульсна електрична міцність коаксіальних кабелів дозволяє одержувати на виході кабельного ІТ короткі імпульси амплітудою в десятки кіловольт.

Перевагою кабельного ІТ є його висока стійкість до сильних динамічних взаємодій, які виникають при проходженні через його обмотки великих

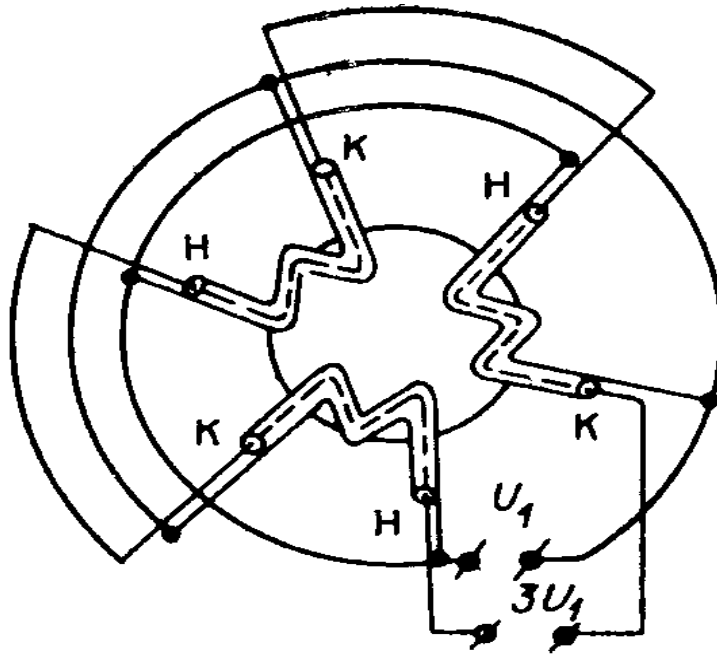


Рис.30. Принципова електрична схема кабельного ІТ.

імпульсних струмів, внаслідок коаксіальності обмоток. Це дозволяє формувати значні імпульсні струми. Обмеженням по величині амплітуди імпульсу є імпульсна електрична міцність коаксіального кабеля ($U_{\text{ІМП}} < 100 \text{ кВ}$).

Для кабелів з $\rho_0 = 50 \text{ Ом}$ і $C_0 = 100 \text{ пФ/м}$ та коефіцієнта трансформації $m_T < 4$ можливо отримати фронт імпульсу тривалість в декілька наносекунд при довжині кабелів порядку 10 см.

8. Контрольні запитання.

1. Як змінюється струм з довжиною іскрового проміжку ?
2. Охарактеризуйте фізичний механізм пробою розрядного проміжку в електричному полі.

3. Нарисуйте якісну модель формування додатнього стрімера.
4. Запишіть умову Таунсенда для пробою розрядного проміжку.
5. Сформулюйте закон Пашена з пробою розрядних проміжків.
6. Охарактеризуйте умови утворення стрімера за Ретером і Міком.
7. Яка швидкість поширення стрімера в однорідному електричному полі ?
8. Дайте визначення критичного числа електронів при формуванні стрімера.
9. Що називають критичною довжиною електронної лавини ?
10. Запишіть емпіричну умову формування стрімера.
11. Що включає в себе час запізнення імпульсного пробою розрядного проміжку ?
12. Який час називається середнім статистичним часом запізнення пробою і від чого він залежить ?
13. Які процеси приводять до утворення ініціюючих електронів з катода при відсутності попередньої зовнішньої іонізації проміжка ?
14. Що називають характеристикою комутації розрядного проміжка ?
15. Наведіть формулу Роме-Вейтцеля для опору іскри і охарактеризуйте її основні складові.

16. Як залежить коефіцієнти a_0 в формулі Ромпе-Вейтцеля від часу, які їх абсолютні значення для повітря та аргону ?
17. Наведіть формулу для опору іскри коли її канал однорідний і знаходиться при умовах термодинамічної рівноваги.
18. Наведіть формулу для визначення часу комутації та охарактеризуйте її складові.
19. Охарактеризуйте основні області застосування іскрових розрядників.
20. За якими принципами відбувається класифікація іскрових розрядників ?
21. Наведіть типові конструкції двохелектродних іскрових розрядників.
22. Як пов'язана напруга пробоя з міжелектродною віддалю двохелектродного іскрового розрядника ?
23. Від чого і як залежить пробивна напруга в двохелектродному іскровому розряднику на атмосферному повітрі ?
24. Від чого і як залежить час комутації двохелектродних розрядників ?
25. Наведіть типові схеми трьохелектродних іскрових розрядників.
26. Які Ви знаєте принципи керування роботою трьохелектродних іскрових розрядників ?

27. Наведіть механізм запалювання розряду в трьохелектродному іскровому розряднику з кільцевим запускаючим електродами в середині проміжку.
28. Охарактеризуйте основні недоліки трьохелектродних іскрових розрядників, які використовують в генераторах високовольтних наносекундних імпульсів.
29. Охарактеризуйте механізм роботи тригатрона та іскрових реле.
30. З яких матеріалів виготовляють електроди іскрових розрядників ?
31. Що називають статичною напругою пробою розрядного проміжку ?
32. Дайте визначення та характеристику електричної стійкості іскрового розрядника.
33. Охарактеризуйте динамічну напругу пробою та час запізнення пробою іскрового розрядника.
34. Наведіть формулу для розрахунку часу запізнення пробою і охарактеризуйте чинники, які на нього впливають.
35. Наведіть формулу для розрахунку втрат потужності в іскрових розрядниках і охарактеризуйте чинники, які на них впливають.
36. Що характеризує час відновлення електричної міцності розрядника ?

37. Наведіть формулу для розрахунку потенціалу згасання розряду в іскровому розряднику і охарактеризуйте чинники, які на нього впливають.
38. Що розуміють під діапазоном робочих напруг іскрового розрядника та охарактеризуйте основні чинники, які його визначають.
39. Дайте визначення ресурсу роботи іскрового розрядника та охарактеризуйте чинники, які приводять до його зниження.
40. Який пристрій називається тиратроном ?
41. Охарактеризуйте основні способи керування тиратронами.
42. Що називають пусковим струмом сітки тиратрона ?
43. Поясніть механізм роботи імпульсних гідрогенних тиратронів.
44. Які чинники впливають на час затримки струму сітки.
45. Дайте розшифровку маркування найуживаніших імпульсних гідрогенних тиратронів.
46. Чим визначаються втрати потужності в гідрогенному тиратроні ?
47. З чого складається теплова потужність катода гідрогенного тиратрона (навести формулу) ?
48. Охарактеризуйте потужність, що витрачається на керування роботою тиратрона.

49. Наведіть формулу для розрахунку стартових втрат потужності в тиратроні і охарактеризуйте розподіл її складових при роботі тиратрона в ключовому режимі ?
50. Дайте визначення часу відновлення прямої електричної міцності тиратрона і охарактеризуйте чинники, які впливають на неї.
51. Нарисуйте криву відновлення запірної напруги тиратрона і охарактеризуйте різні часові стадії відновлення запірних властивостей тиратрона.
52. Нарисуйте криву відновлення електричної міцності гідрогенного тиратрона ТГИ I – 1000/25.
53. Який пристрій називають таситроном ?
54. Порівняйте криві розподілу потенціалу і плазмовий шар в тиратроні і таситроні ?
55. Нарисуйте схему з'єднань електродів з виводами для гідрогенних тиратронів ТГИ I - 500/16 та ТГИ I – 1000/25.
56. Охарактеризуйте конструкцію гідрогенного тиратрона ТГИ I – 1000/25.
57. Як залежить максимально допустимі імпульсна потужність від частоти для гідрогенного тиратрона ТГИ I – 1000/25.

58. Охарактеризуйте умови експлуатації та вмикання гідрогенних тиратронів ТГИ I 500/16 і ТГИ I – 1000/25.
59. При яких умовах тиратрони ТГИ I 500/16 і ТГИ I – 1000/25 можуть працювати в ключовому режимі з частотою 10-50 кГц ?
60. Які умови форсованого вмикання гідрогенних тиратронів ТГИ I 500/16 і ТГИ I – 1000/25.
61. Охарактеризуйте максимально допустимі параметри при роботі з гідрогенним тиратроном ТГИ I 500/16.
62. Охарактеризуйте максимально допустимі параметри при роботі з гідрогенним тиратроном ТГИ I 1000/25.
63. Які умови застосування резисторів в високовольтних пристроях з імпульсами короткої тривалості ?
64. Наведіть залежність глибини проникнення струму в провідник від частоти та параметрів провідника.
65. Що називають коефіцієнтом форми резистора (наведіть формулу) ?
66. Наведіть вирази для розрахунку погонних параметрів циліндричних високовольтних резисторів.

67. При яких умовах схему заміщення високовольтного резистора можливо представити в вигляді паралельної (RC), а при яких в вигляді послідовної (LC) ланки ?
68. Як залежить опір високовольтних резисторів від напруги та які причини цього явища ?
69. Чим обмежується максимально допустима робоча напруга на резисторі (наведіть зв'язок між U_p і довжиною резистора та тиском газового середовища, де встановлено резистор) ?
70. Дайте коротку характеристику високовольтних резисторів типу «УНУ» та «МОУ».
71. Чим визначається потужність втрат у реальному високовольтному імпульсному конденсаторі ?
72. Охарактеризуйте метод визначення потужності втрат в конденсаторі.
73. Наведіть схему заміщення і діаграму струмів та напруг у реальному конденсаторі.
74. Як залежать параметри високовольтного імпульсного конденсатора від частоти ?
75. Наведіть основні вимоги до високовольтних імпульсних конденсаторів ?

76. Від чого залежить індуктивність обкладинок високовольтного імпульсного конденсатора з паперово-масляною ізоляцією і будовою в вигляді секцій з окремих рулонів ?
77. Від чого залежить індуктивність виводів секцій рулонного високовольтного імпульсного конденсатора ?
78. Охарактеризуйте причини і механізм старіння високовольтних імпульсних конденсаторів ?
79. Дайте характеристику параметрів основних рідинних діелектриків для високовольтних імпульсних конденсаторів ?
80. Які стадії та яким є механізм старіння кераміки в високовольтних конденсаторах ?
81. Охарактеризуйте можливі причини пробою кераміки в високовольтних імпульсних конденсаторах ?
82. Охарактеризуйте серійні високовольтні імпульсні конденсатори ?
83. Якими є причини і механізм старіння високовольтних імпульсних конденсаторів з рідинним діелектриком ?
84. Охарактеризуйте параметри основних рідинних діелектриків в високовольтних імпульсних конденсаторах ?

85. Які стадії та механізм старіння кераміки в високовольтних конденсаторах ?
86. Які причини (крім старіння кераміки), що приводять до виходу з ладу імпульсного конденсатора ?
87. Нарисуйте схему і охарактеризуйте принцип дії імпульсного трансформатора на відрізках довгих ліній.
88. Нарисуйте схему і охарактеризуйте принцип дії імпульсного кабельного трансформатора.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г.А. Месяц // Генерирование мощных наносекундных импульсов. М. «Советское радио», 1974. Глава 1. С.6-16. Глава 5.С.87-96.
2. В.В. Кремнев, Г.А. Месяц // Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Н. «Наука», 1987. Глава 6. С.135-144.
3. Ю.В. Киселев, В.П. Черепанов // Искровые разрядники. М. «Советское радио. С.7-31.
4. Б.П. Беленький, П.Н. Бондаренко, М.Э. Борисова, С.Н. Койков, О.Л. Мезенин // Расчет эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов. М. «Радио и связь». 1988. Глава 6, С.205-210.
5. А.Л. Лившиц, М.Ш. Отто // Импульсная электротехника. М. «Энерго - атомиздат». 1983. С.
6. Э.Д. Лозанский, О.Б.Фирсов // Теория искры. М. Атомиздат.1975. Глава 3, С.103-107, 116-122; Глава 4, С.126-135.
7. Ю.П. Райзер // Физика газового разряда. М. Наука. 1987. Глава 17, С.486-504.
8. Технический паспорт и инструкции по работе с импульсными водородными тиратронами ТГИ I – 500/16 и ТГИ I – 1000/25.