

**621.38
Ш350**

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Запорізька державна інженерна академія



**Швець Є.Я.
Юдачов А.В.
Турба М.М.**

ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА

ЧАСТИНА 3

ПЛАЗМОВІ ПРИЛАДИ

Навчально–методичний посібник

*для студентів спеціальності 6.090804
«Фізична та біомедична електроніка»*

**Запоріжжя
2011**

Міністерство освіти та науки, молоді та спорту України

Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням вченої ради ЗДІА,
протокол №хх від хх.хх.20ххр.*

ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА

ЧАСТИНА 3

ПЛАЗМОВІ ПРИЛАДИ

Навчально–методичний посібник

*для студентів спеціальності 6.090804
«Фізична та біомедична електроніка»*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ФБМЕ,
протокол № х від 01.09.2011р.*

ББК621.38
УДК III 360

Вакуумна та плазмова електроніка Частина 3. Плазмові прилади.
Навчально–методичний посібник для студентів спеціальності 6.0908.04
«Фізична та біомедична електроніка» /Укладачі Є.Я. Швець, А.В.Юдачов,
Турба М.М. – Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2011р. – 138 с.

Укладачі *Є.Я. Швець, к.т.н., професор*
А.В. Юдачов, ст. викладач
М.М. Турба, к.ф.м.н., професор

Відповідальний за випуск: *зав. кафедрою ФБМЕ*
проф. Є.Я.Швець

У посібнику викладені основні теоретичні відомості стосовно властивостей плазми, її параметрів, а також принципів дії та конструкції газорозрядних приладів. Приведені питання для самоконтролю і підготовки до тестування з основних розділів відповідної навчальної програми.

Рецензенти:

Корнич Г.В., д.ф.м.н., професор, завідувач кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Запорізького національного технічного університету
Трубіцин Ю.В. д.т.н., професор, завідувач кафедри електроніки та інформатики Класичного приватного університету

Зміст

Вступ.....	4
1 Плазмова електроніка.....	5
1.1 Основні поняття про плазму	5
1.2 Основні властивості і параметри плазми	6
1.3 Класифікація видів плазми.....	15
1.4 Електричний розряд в газах	17
1.4.1 Фізичні явища в газі при електричному розряді.....	17
1.4.2 Класифікація електричних розрядів в газі	25
1.4.3 Основи теорії пробую в газі.....	27
1.4.4 Вольт–амперна характеристика газового розряду.....	32
1.4.5 Несамостійні газові розряди	34
1.4.6 Самостійні газові розряди.....	38
1.5 Газорозрядні прилади.....	46
1.5.1 Некеровані газорозрядні прилади.....	46
1.5.2 Керовані газорозрядні прилади	71
1.5.3 Газорозрядні прилади зі схрещеними електричним та магнітним поллями	118
1.5.4 Керовані газорозрядні прилади зі схрещеними електричним і магнітним поллями	125
Питання для самоконтролю і підготовки до тестування	130
Додаток 1 - Умовно – графічні позначення (УГП) газорозрядних приладів	135
Рекомендована література	136

Вступ

Навчальний посібник з дисципліни «Вакуумна і плазмова електроніка чЗ. Плазмові прилади» відповідає вимогам навчального плану спеціальності 6.0908.04 «Фізична та біомедична електроніка» і змісту навчальної програми дисципліни «Вакуумна і плазмова електроніка».

У навчальному посібнику з дисципліни «Вакуумна і плазмова електроніка чЗ. Плазмові прилади» викладено основні поняття про плазму, її параметри і характеристики, приведена класифікація видів плазми. Розглянуто окремі види електричних розрядів в газовому середовищі їх параметри характеристики і області застосування. Також в цьому розділі розглянуто різні види плазмових (газорозрядних) приладів. Окремо приведені конструкції, параметри, характеристики, переваги і недоліки некерованих газорозрядних приладів і області їх застосування. У окремому підрозділі приведені аналогічні відомості для керованих газорозрядних приладів.

При вивченні курсу «Вакуумна і плазмова електроніка» необхідні знання таких розділів вищої математики:

- теорія алгебри і диференціальних рівнянь;
- диференційне та інтегральне числення;

фізики:

- молекулярна фізика,
- кінетична теорія газів,
- електростатика,
- електродинаміка,
- магнетизм,
- електричний струм у різних середовищах,

основи теорії електричних кіл:

- електричні ланцюги постійного струму,
- електричні ланцюги змінного струму,
- електричні ланцюги з нелінійними елементами.

Навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форми навчання.

1 Плазмова електроніка

Плазмова електроніка – розділ електроніки, в якому вивчаються процеси колективної взаємодії потоків заряджених частинок з плазмою і іонізованим газом, що приводять до збудження в системі хвиль і коливань, а також використання ефектів такої взаємодії для створення приладів і пристроїв електронної техніки.

1.1 Основні поняття про плазму

Плазма (від грец. *plásma* — виліплене, оформлене) – частково або повністю іонізований газ, в якому щільність позитивних і негативних зарядів практично однакова. Термін «**Плазма**» у фізиці був введений в 1923 американськими ученими І. Ленгмюром і Л. Тонксом, що проводили зондові вимірювання параметрів низькотемпературної газорозрядної плазми. В стані плазми знаходиться переважна частина речовини Всесвіту: зірки, зоряні атмосфери, галактичні туманності і міжзоряне середовище. Біля Землі плазма існує в космосі у вигляді сонячного вітру, заповнює магнітосферу Землі (утворюючи радіаційні пояси Землі) і іоносферу. Процесами в навколоземній плазмі обумовлені магнітні бурі і полярні сяйва. Віддзеркалення радіохвиль від іоносферної плазми забезпечує можливість дальнього радіозв'язку на Землі. У лабораторних і промислових умовах плазма утворюється при електричному розряді в газах (дуговому розряді, іскровому розряді, тліючому розряді і ін.), в процесах горіння і вибуху. Плазма використовується в плазмових прискорювачах, магнітогідродинамічних генераторах і в багатьох інших пристроях.

З курсу фізики відомо, що будь-яка речовина при зміні його температури проходить три фази станів (тверда, рідка і газоподібна). Перехід речовини з

однієї фази в іншу обумовлений надлишком величини енергії, якою характеризуються атоми (молекули) речовини. Величина енергії молекул речовини пропорційна його температурі. Досягши температури випаровування будь-яка речовина випаровується, перетворюючись на газ. Якщо збільшувати температуру і далі, молекули газу почнуть розпадатися на атоми. Електрони цих атомів при такій температурі набувають енергії достатню для того, щоб розірвати зв'язок з атомом і стати вільними. В результаті такого процесу значна частина атомів втрачає або придбає один або декілька електронів і перетворюються на іони. Залежно від кількості втрачених або придбаних іонів розрізняють різні ступені іонізації газу.

1.2 Основні властивості і параметри плазми

Властивості плазми різко відрізняється від властивостей нейтральних газів, при цьому визначальну роль грають два чинники. По-перше, взаємодія частинок плазми між собою характеризується кулонівськими силами взаємодії (тяжіння і відштовхування), які зменшуються з відстанню набагато повільніше (тобто є значно більш «дальнодіючими»), ніж сили взаємодії нейтральних частинок. З цієї причини взаємодія частинок в плазмі є, строго кажучи, не «парною», а «колективною» – одночасно взаємодіє один з одним велике число частинок. По-друге, електричні і магнітні поля сильно взаємодіють з плазмою (у той же час як з нейтральними газами їх взаємодія дуже слабка). Ці взаємодії викликають появу в плазмі об'ємних зарядів і струмів, що, обумовлює цілий ряд її специфічних властивостей. Останні дозволяють розглядати плазму як особливий, четвертий стан речовини.

Стан плазми, як і всякого газу, визначається її складом, концентрацією компонентів і температурою. Позначимо парціальні концентрації компонентів плазми n_α , додаючи індексу іонізації плазми α значення a (нейтральні частинки), i (іони), e (електрони). Плазма може містити різні види атомів і іонів. В більшості випадків розглядається так звана **прост а плазма**, що

складається з нейтральних частинок одного вигляду, односторонніх іонів того ж вигляду і електронів.

Ступенем іонізації плазми α називається відношення числа іонізованих атомів до повного їх числа в одиниці об'єму плазми

$$\alpha = n_i / (n_i + n_a) .$$

Залежно від величини α розрізняють слабо, сильно і повністю іонізовану плазму.

У фізиці плазми температуру T вимірюють в енергетичних одиницях, ототожнюючи її з енергією κT ,

$$T = \kappa T^\circ$$

де $\kappa = 1,38 \cdot 10^{-16}$ ерг/град — постійна Больцмана, T° — температура $^\circ K$. Для вимірювання температури користуються такою одиницею як електронвольт:

$$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-12} \text{ ерг} = 11600^\circ K.$$

Зв'язок середньої енергії теплового руху частинок W з температурою плазми, як для будь-якого рівноважного газу, дається рівністю

$$W = (3/2) T$$

У рівноважній плазмі температура визначає середню енергію і розподіл частинок за швидкостями (максвелівський розподіл). У такій плазмі величини концентрацій і температури повністю характеризують її стан. Знаючи концентрацію і температуру плазми можна знайти ступінь іонізації, концентрацію іонів, збуджених атомів, фотонів і т.п. Проте далеко не завжди плазму можна вважати рівноважною. Зокрема, газорозрядна плазма, що звичайно одержують в лабораторії, далека від рівноваги. В деяких випадках

зустрічається так звана часткова рівновага, при якій розподіл швидкостей заряджених і нейтральних частинок – максвеловський, але температури, що визначають цей розподіл для електронів і важких частинок, різні. Для такої неізотермічної плазми вводять окремо електронну і іонну температури T_e T_i . У загальному випадку нерівноважної плазми розподіл швидкостей заряджених частинок може істотно відрізнятися від максвеловського розподілу.

Квазінейтральність плазми

До найважливіших властивостей плазми відноситься її квазінейтральність. Під квазінейтральністю плазми мається на увазі практичне співпадання щільності електронів і іонів в об'ємі, де знаходиться речовина в стані плазми. Тому в стані рівноваги *просторові заряди* негативних електронів і позитивних іонів що входять до складу плазми, повинні компенсувати один одного так, щоб повне поле усередині плазми було рівне нулю.

Проте така компенсація має місце лише в середньому – в достатньо великих об'ємах і за достатньо великі інтервали часу. Розміри областей і проміжки часу, в межах яких може порушуватися компенсація об'ємного заряду, називають *просторовим і тимчасовим масштабами розділення зарядів*.

Для визначення величини просторового масштабу розділення зарядів припустимо, що в деякому об'ємі плазми нейтральність порушена. Для простоти вважатимемо, що це порушення відбувається в результаті зсуву плоского шару електронів. При цьому утворюються шари негативного і позитивного об'ємних зарядів (рис. 1.1, а).

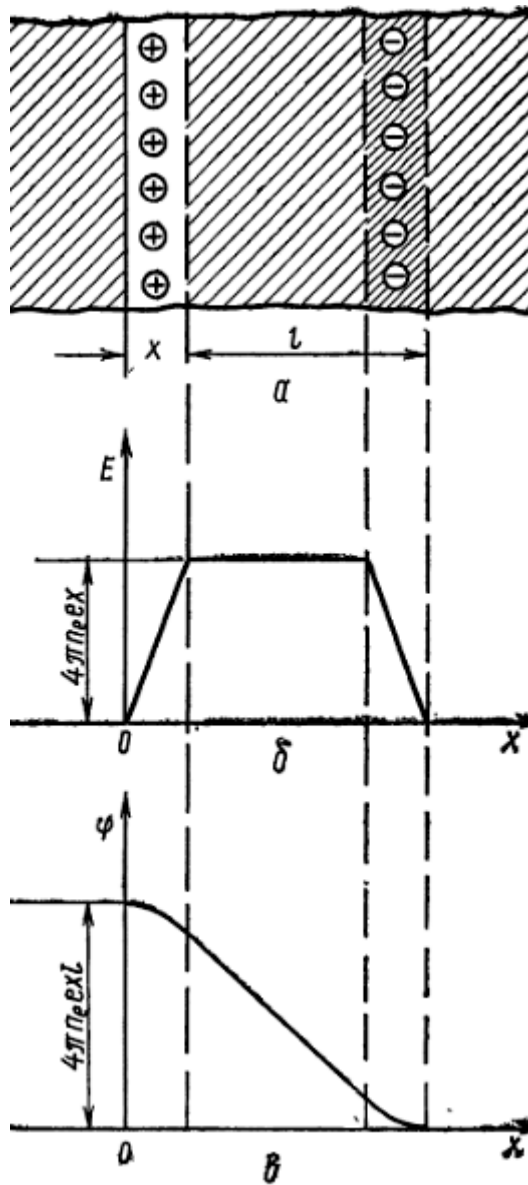


Рисунок 1.1 – До визначення просторового розділення зарядів

Електричне поле між шарами еквівалентно полю плоского конденсатора. Напруженість поля E визначається поверхневою щільністю заряду σ .

$$E = 4\pi\sigma = 4\pi n_e e x,$$

де e — заряд; n_e — щільність електронів; x — зсув шару.

Розподіл напруженості поля і потенціалу φ показано на рис. 1.1, б, в.

Повна різниця потенціалів ϕ_l дорівнює

$$\phi_l = E l = 4\pi n_e e x l$$

де l — товщина шару. Очевидно, що порушення нейтральності, викликане зсувом шару електронів, може підтримуватися лише у випадку, якщо висота потенційного бар'єру поля об'ємного заряду менше енергії хаотичного руху електронів і іонів: $e\phi_l < T_e, T_i$.

Підставляючи в цю нерівність величину $\Delta\phi_e$ і вважаючи $x \approx l$, одержуємо $4\pi n_e e^2 l^2 \ll T$ або

$$l < \sqrt{\frac{\tilde{O}}{4\pi e^2 n_e}},$$

де T — менша з величин T_e або T_i . Величина, що стоїть, в правій частині, визначає з точністю до чисельного коефіцієнта максимальний масштаб розділення зарядів в плазмі. Цю величину називають радіусом Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{T}{4\pi e^2 n_e}} = 743 \sqrt{\frac{T[\text{эВ}]}{n_e[\text{см}^{-3}]}} [\text{см}]$$

Квазінейтральність дотримується, якщо лінійні розміри області, займаною плазмою, багато більше *дебаєвського радіусу екранування*.

Саме у тому випадку, коли дебаєвський радіус менше характерних розмірів іонізованого об'єкту, середовище прийнято називати *плазмою*. Якщо прикласти до плазмового об'єкту зовнішнє поле, то воно проникатиме всередину на глибину лише порядку дебаєвського радіусу, величина якого залежить від температури плазми.

Для визначення масштабу розділення зарядів у часі розглянемо рух електронів після порушення нейтральності. У області знаходження електронного шару на електрони діє сила притягіння з боку іонів, рівна $eE = 4\pi n_e e^2 x$. Рівняння руху електронів має вигляд

$$m_e d^2 x / dt^2 = 4\pi n_e e^2 x.$$

Воно описує гармонійні коливання з частотою

$$\omega_D = \sqrt{\frac{4\pi n_e e^2}{m_e}}.$$

Нескладно зрозуміти природу цих коливань електронного шару. Шар електронів притягується до іонного шару, проходить мимо нього за інерцією, знову притягується і т.д. Коливання будуть не затухаючими, якщо не враховувати тепловий рух заряджених частинок і дисипацію. Коливання просторового заряду при порушенні квазінейтральності були вперше виявлені Ленгмюром. Їх називають плазовими, або ленгмюрівськими, коливаннями. Частоту цих коливань відповідно називають плазовою, або ленгмюрівською, частотою.

Плазові коливання визначають механізм відновлення квазінейтральності. Очевидно, що в середньому, за багато періодів коливань, плазму можна вважати нейтральним середовищем. Тому часовий масштаб розділення зарядів в плазмі визначається величиною

$$t_D \approx \frac{1}{\omega_D} = \sqrt{\frac{m_e}{4\pi n_e e^2}}.$$

Його зв'язок з просторовим масштабом розділення зарядів дуже простий:

$$t_D = r_D / v_{Te},,$$

де $v_{Te} = \sqrt{\frac{\bar{O}_a}{m_e}}$ — теплова швидкість електронів.

Порушення квазінейтральності в об'ємі, займаному плазмою, веде до негайної появи сильних електричних полів просторових зарядів, які тут же поновлюють її квазінейтральність.

Особливості руху заряджених частинок в плазмі

Основні властивості плазми визначаються рухом в ній заряджених частинок. За відсутності зовнішніх полів характер руху заряджених частинок в слабоіонізованій плазмі, в якій основний вплив на їх рух роблять зіткнення з нейтральними атомами, аналогічний характеру руху частинок в звичайному газі. За умов, коли довжина вільного пробігу частинки багато менше розмірів плазми, траєкторія руху складається з більш менш протяжних відрізків прямих, відповідних періодам між зіткненнями, і областей зіткнення, в межах яких змінюються напрям руху і швидкість частинок (рис. 1.2, а).

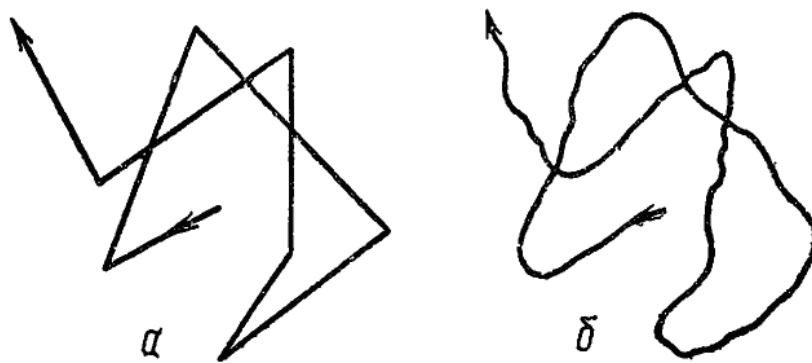


Рисунок 1.2 – Траєкторії рухів частинок в плазмі

При цьому зіткнення можна вважати точковими, оскільки ефективний радіус взаємодії заряджених частинок з нейтральними багато менше **довжини** вільного пробігу.

Істотна відмінність властивостей плазми від властивостей такого газу, що складається з нейтральних частинок, зв'язана, перш за все, з впливом на рух заряджених частинок електричного і магнітного полів. Електричне поле (зовнішнє поле і поле просторового заряду) викликає прискорення заряджених частинок в період між зіткненнями. В середньому за велике число періодів таке прискорення приводить до появи направленого руху частинок і до збільшення швидкості хаотичного руху, тобто до нагріву плазми. При цьому нагрів різних компонент плазми (електронної і іонної) виявляється різним. Електрони набувають звичайно більшої енергії, ніж іони. Магнітне поле може приводити до закручування траєкторій заряджених частинок в площині перпендикулярної полю. За умов, коли радіус обертання заряджених частинок в магнітному полі (так званий *ларморовський радіус*) багато менше довжини вільного пробігу, вплив поля на рух частинок стає істотним. Їх переміщення в напрямі, перпендикулярному магнітному полю на відстані, величина яких більше ларморовського радіусу, може бути обумовлено зіткненнями або дрейфом заряджених частинок, пов'язаним з електричним полем, а також з неоднорідністю магнітного поля.

Інша важлива особливість руху заряджених частинок виявляється в сильноіонізованій плазмі, коли визначальну роль грають зіткнення заряджених частинок один з одним. Ця особливість пов'язана з тим, що кулонівський потенціал, що визначає взаємодію між зарядженими частинками, поволі зменшується з відстанню. Тому їх взаємодія істотна на відстанях, які багато більше розмірів атомів. Обмеження радіусу дії кулонівських сил пов'язане лише з екрануванням поля взаємодії в плазмі. Граничний радіус можна вважати рівним дебаєвському радіусу екранування. Оскільки в сферу з радіусом, рівним дебаєвському, входить звичайно велика кількість електронів і іонів, взаємодія заряджених частинок, не зводиться до парних зіткнень. Траєкторія руху частинки при обліку цих зіткнень вже не може бути представлена у вигляді ламаної лінії з чітко розділеними періодами зіткнень і періодами між зіткненнями, а носить більш складний характер (рис. 1.2, б). При аналізі

доводиться враховувати взаємодію кожної частинки з багатьма іншими, що знаходяться в дебаєвській сфері. Проте оскільки взаємодія з частинками, що знаходяться на великих відстанях (масштабу дебаєвського радіусу) приводить до відхилення частинок на малі кути, можлива наближена заміна колективної взаємодії сукупністю парних зіткнень. Вона недопустима лише при великих концентраціях заряджених частинок, коли енергія взаємодії між ними стає порівнянною з тепловою енергією. При цьому властивості плазми істотно відрізняються від властивостей ідеального газу, для якого застосовна модель парних зіткнень.

Для оцінки величини концентрації заряджених частинок, яка визначає цей перехід скористаємось співвідношенням потенційної енергії взаємодії на відстанях порядку дебаєвського радіусу

$$U \approx \frac{e^2}{r_D} = e^3 \sqrt{\frac{4\pi n}{T}}.$$

Потенційна енергія взаємодії мала в порівнянні з тепловою енергією за умови

$$n \ll \frac{T^3}{4\pi e^6},$$

або $n \ll 10^{19} T^3$. Ця нерівність і визначає умови «слабкого» взаємодії, характерні для ідеального газу.

1.3 Класифікація видів плазми

На підставі приведених вище характеристик і параметрів плазмових об'єктів (парціальні концентрації компонент плазми n_α , температури T , ступеню іонізації α і т.і.) допустимо класифікувати плазму за наступними напрямками:

- виродженість (класична і вироджена плазма),
- ідеальність (ідеальна і неідеальна плазма),
- температура (низькотемпературна і високотемпературна плазма),
- ступінь іонізації (слабо іонізована і повністю іонізована плазма).

Виродженість плазми. Класичною плазмою можна вважати плазму, в якій відстань між її частинками λ_n багато більше, ніж величина довжини хвилі Де-Бройля

$$\lambda_n \gg \lambda_{d-B}.$$

У класичній плазмі окремі її частинки можна розглядати як точкові заряди.

Виродженою плазмою слід вважати плазму, в якій відстань між її частинками λ_n менше або рівна величині довжини хвилі Де-Бройля

$$\lambda_n \leq \lambda_{d-B}$$

У виродженій плазмі істотні квантовомеханічні ефекти.

Ідеальність плазми. Ідеальною плазмою можна вважати плазму, в якій енергія електричної взаємодії між частинками набагато менше кінетичної енергії цих частинок.

$$W_E \ll W_k$$

Температ ура плазми. Залежно від величини температури плазми розрізняють **низькот емперат урну плазму** ($T < 10\text{eV}$) і **високот емперат урну плазму** ($T > 10\text{eV}$). Хоча такий розподіл в значній мірі умовний, він відображає той факт, що високотемпературна воднева плазма є повністю іонізованою, тоді як в низькотемпературній плазмі звичайно важливим є урахування наявності нейтральних частинок.

У випадку якщо температура електронів і іонів в плазмі однакова, плазму називають **ізот ермічною**. У випадку якщо температура електронів і іонів в плазмі неоднакова, плазму називають **неізот ермічною** і для такої плазми необхідно ввести окремо електронну і іонну температури T_e , та відповідно T_i .

Ст упінь іонізації плазми. Слабоіонізованою плазмою слід вважати плазму, у складі якої присутня значна частка нейтральних атомів.

Таким чином, до типових параметрів, які характеризують практично будь-яку плазму, слід віднести її температуру і концентрацію компонент плазми. Ці параметри для плазми різних походжень і областей застосувань приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 1.1 – Параметри плазми

Вид плазми	n, cm^{-3}	$T, \text{эВ}$
Магнітний ПТС	$10^{12} \div 10^{15}$	$10^3 \div 10^4$
Газовий розряд	$10^6 \div 10^{12}$	~ 1
Сонячний вітер	~ 5	$10 \div 50$
Сонячна корона	$\sim 10^6$	~ 200
Сонячна атмосфера	$\sim 10^{14}$	~ 1
Сонячне ядро	$\sim 10^{25}$	~ 1600
Тверде тіло (метал)	$10^{24} \div 10^{25}$	~ 0.01
Іоносфера Землі	~ 5	$10 \div 50$
Міжзоряний газ	~ 1	$0.01 \div 1$

Газорозрядними називають електронні прилади, принципи дії яких засновані на застосуванні речовин (газів), які знаходяться в стані плазми. Звичайно у газорозрядних приладах використовується низькотемпературна плазма.

1.4 Електричний розряд в газах

Гази в нормальних умовах є діелектриками, оскільки вони складаються з нейтральних атомів і молекул і не містять в своєму складі вільних носіїв зарядів (електронів та іонів). Провідниками електричного струму гази стають тільки при їх іонізації.

Електричний розряд в газах – проходження електричного струму через газове середовище під дією електричного поля, що супроводжується зміною стану газу.

1.4.1 Фізичні явища в газі при електричному розряді

Для виникнення провідності в газовому проміжку необхідна наявність в ньому вільних носіїв зарядів (електронів і іонів). Такі носії можуть з'явитися в газі при його іонізації.

Іонізація це утворення позитивних і негативних іонів і вільних електронів з електрично-нейтральних атомів і молекул.

Для розділення нейтрального не збудженого атома (молекули) на дві або більш заряджені частинки, тобто для його іонізації, необхідно витратити енергію іонізації W . Для всіх атомів даного елемента (або молекул даної хімічної сполуки), які іонізуються з основного стану однаковим чином (з утворенням однакових іонів), енергія іонізації однакова. Простий акт іонізації – відщеплення від атома (молекули) одного електрона і утворення позитивного іона. Властивості частинки по відношенню до такої іонізації характеризують її

іонізаційним потенціалом, який є енергією іонізації, віднесена до заряду електрона. Іонізаційний потенціал – міра енергії іонізації, яка дорівнює роботі викидання електрона з атома або молекули і характеризує міцність зв'язку електрона в атомі або молекулі.

У таблиці 2.2 дані значення енергії іонізації деяких атомів.

Таблиця 1.2 – Енергії іонізації атомів

Елемент	He	Ne	Ar	Hg	Na	K	Rb
Енергія іонізації, еВ	24,5	21,5	13,9	10,4	5,12	4,32	4,68

Для атомів значення першого іонізаційного потенціалу, відповідного видаленню найбільш слабо зв'язаного електрона з нейтрального атома в основному стані, складають від 3,894 еВ для Cs до 24,587 еВ для He. Вони періодично змінюються залежно від атомного номера Z (см. рис.1.3).

Іонізаційний потенціал зростає при підвищенні ступеня іонізації атома.

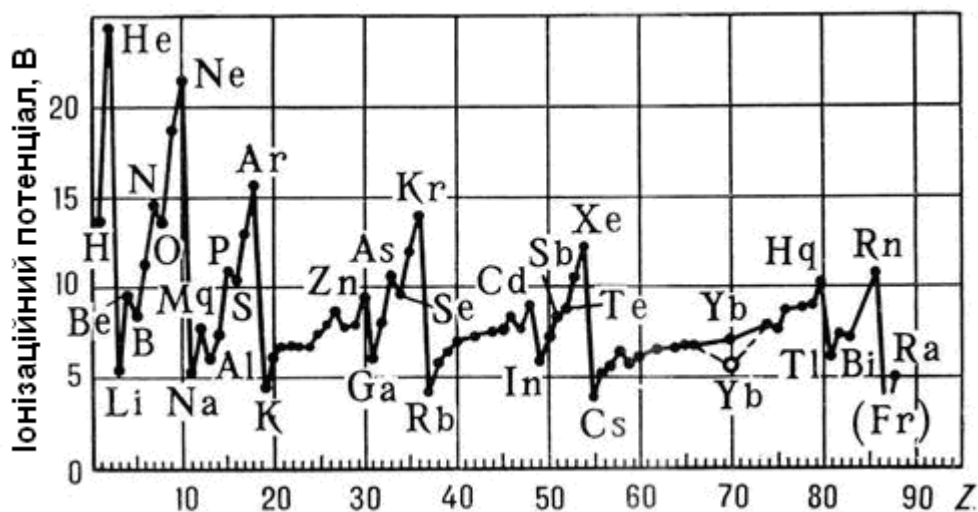


Рисунок 1.3 – Залежність іонізаційного потенціалу від атомного номера

Залежно від того, яким чином нейтральній частинці надається енергія іонізації, розрізняють наступні види іонізації:

- ударна іонізація,
- фотоіонізація,
- термічна іонізація.

Якщо енергія іонізації W надається частинці, яка іонізується іншою частинкою (електроном, атомом або іоном) при їх зіткненні, така іонізація називається *ударною*. Зіткнення частинок можуть мати *пружний* і *непружний* характер. При пружному зіткненні змінюється напрям руху частинок і відбувається обмін імпульсами і кінетичною енергією. При непружному зіткненні змінюється внутрішня енергія і стан однієї з частинок. Іонізація атома при ударі електроном відбувається за рахунок передачі кінетичної енергії електрона атому.

Кількість актів іонізації в одиницю часу (швидкість іонізації) пропорційно щільності частинок газу n , швидкості руху частинки v і перетину іонізації σ_i :

$$V_i = n v \sigma_i$$

Іонізаційний пробіг λ_i (довжина, на якій частинка може іонізувати атом) дорівнює

$$\lambda_i = v/V_i = 1/(n \sigma_i) = 1/S_i$$

де $S_i = n \sigma_i$ називається *сумарним перетином іонізації*.

Час перебування атома у збудженому стані можна пов'язати з числом переходів в одиниці об'єму в одиницю часу N ; тоді за проміжок часу dt є число переходів:

$$Ndt = w n_a dt,$$

де w – вірогідність даного переходу n_a – концентрація збуджених атомів. Число актів випромінювання рівне спаду числа збуджених атомів:

$$Ndt = -dn_a$$

тоді

$$dn_a = -wn_a dt.$$

Таким чином, число збуджених атомів змінюється в часі згідно із законом:

$$n_a(t) = n_{a0} \exp(-wt),$$

де n_{a0} – концентрація збуджених атомів в початковий момент часу. За час $t_0 = 1/w$ концентрація зменшується в «e» раз. Цей час і вважають часом перебування атома у збудженому стані.

Вірогідність ударної іонізації залежить від роду частинок, які іонізуються і частинок, які бомбардують, а також і від кінетичної енергії E_k останніх. До деякого мінімального (граничного) значення E_k ця вірогідність рівна нулю, при збільшенні значення E_k вище за поріг вона спочатку швидко зростає, досягає максимуму, а потім зменшується (рис. 1.4).

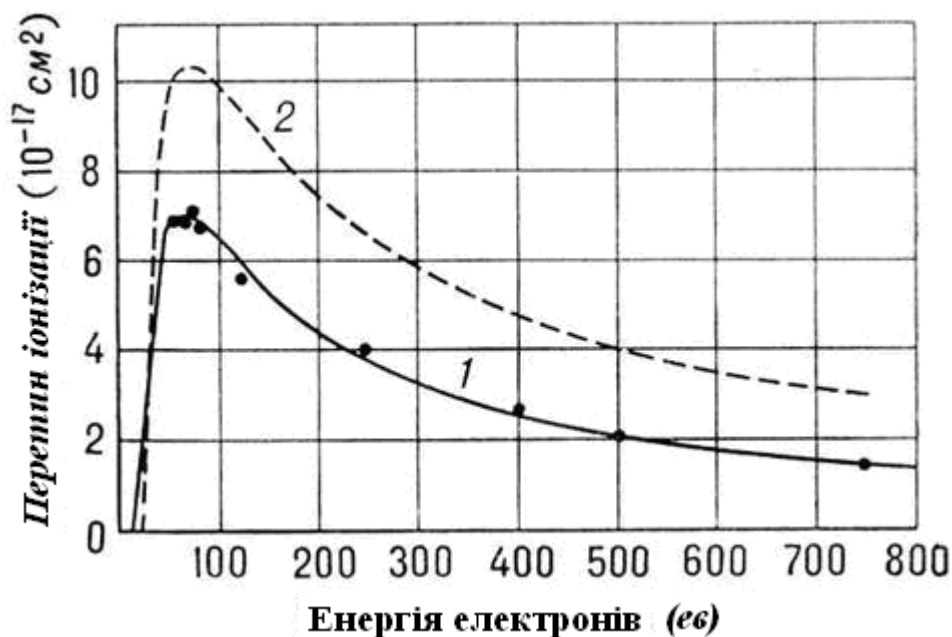


Рисунок 1.4 – Вірогідність ударної іонізації від кінетичної енергії, частинок які бомбардують

Якщо величини енергій, які передаються частинкам що іонізуються в зіткненнях, достатньо великі, можливо утворення з них, разом з однозарядними іонами, і багатозарядних іонів (багатократна іонізація) (рис. 1.5).

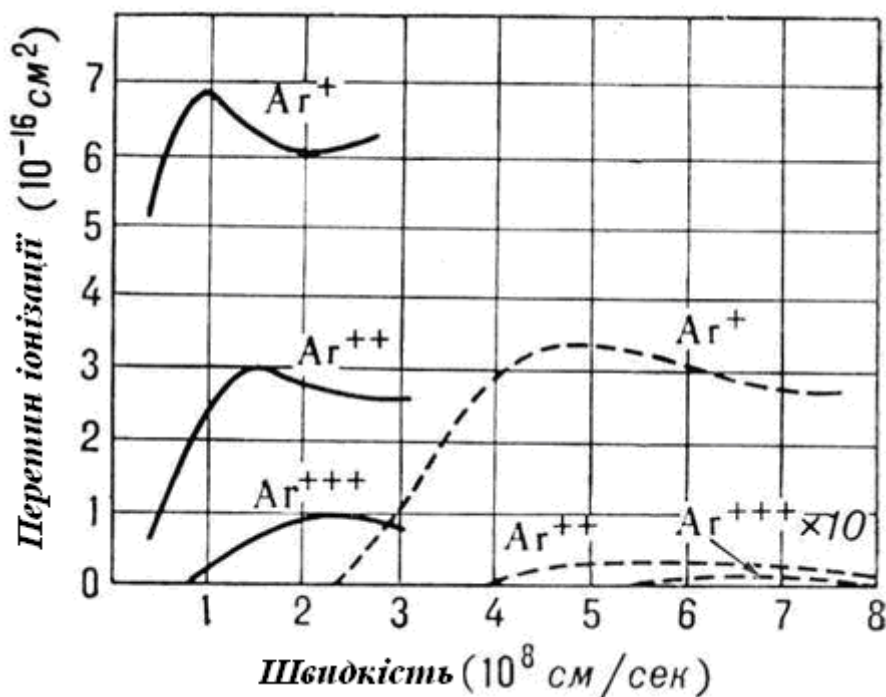


Рисунок 1.5 – Залежність перетину іонізації від швидкості руху іонізуючих часток

У певних умовах частинки можуть іонізуватися і при зіткненнях, в яких передається енергія, менша W . спочатку атоми (молекули) збуджуються ударами, після чого для їх іонізації досить надати їм енергію, яка дорівнює різниці W і енергії збудження. Таким чином, «накопичення» необхідної для іонізації енергії здійснюється в декількох послідовних зіткненнях. Подібна іонізація називається ступінчастою. Вона можлива, якщо зіткнення відбуваються так часто, що частинка в проміжку між двома зіткненнями не встигає втратити енергію, одержану в першому з них (достатньо щільні гази та потоки частинок, що бомбардують з високою інтенсивністю). Крім того, механізм ступінчастої іонізації дуже істотний у випадках, коли частинки речовини, яка іонізується, знаходяться у метастабільному стану, тобто здатні відносно довгий час зберігати енергію збудження. Час життя таких частинок

складає від 10^{-4} до декількох секунд. Самий нижній метастабільний рівень називається **резонансним**. Для ртуті резонансний рівень збудження рівний 4,7eV, при перевищенні енергією електронів цього значення спостерігається перший провал на залежності від потенціалу, який прискорює електрони. Метастабільна частинка при зіткненні з електроном може і *дезактивуватися*, тобто перейти в основний стан, цей процес називається *непружним зіткненням другого роду*.

Процеси, в яких частинки, що іонізуються, одержують енергію іонізації від фотонів (квантів електромагнітного випромінювання), називають **фотойонізацією**. Якщо атом (молекула) незбуджений, то енергія іонізуючого фотона $W_\phi = h\nu$ (h — постійна Планка, ν — частота випромінювання) повинна бути не менше енергії іонізації W . Для всіх атомів і молекул в газах і рідинах енергія іонізації W така, що цій умові задовольняють лише ультрафіолетові та більш жорсткі (з більшою частотою) фотони. Проте фотойонізацію спостерігають і при $h\nu < W$, наприклад, при опромінюванні видимим світлом. Пояснюється це тим, що вона може мати характер ступінчастої іонізації: спочатку поглинання одного фотона порушує частинку, після чого взаємодія з наступним фотоном приводить до іонізації. На відміну від ударної іонізації, вірогідність фотойонізації максимальна саме при граничній енергії фотона $h\nu < W$, а потім із зростанням енергії вона падає. Максимум перетину фотойонізації в $100 \div 1000$ разів менше, ніж при ударній іонізації. Менша вірогідність компенсується в багатьох процесах фотойонізації значною щільністю потоку фотонів, і число актів іонізації може бути дуже великим.

Якщо різниця $h\nu - W$ відносно невелика, то фотон поглинається в акті іонізації. Фотони великих енергій (рентгенівські g-кванти), витрачаючи при іонізації частину енергії ΔE , змінюють свою частоту на величину $\Delta\nu = \Delta E/h$. Такі фотони, проходячи через речовину, можуть викликати велике число актів фотойонізації. Різниця $\Delta E - W$ (або $h\nu - W$ при поглинанні фотона) перетворюється на кінетичну енергію продуктів іонізації, зокрема, вільних електронів, які можуть здійснювати вторинні акти іонізації (вже ударної).

Термічна іонізація відбувається, коли енергія теплового руху атомів (молекул) речовини достатньо велика, і вони можуть іонізувати один одного при взаємних зіткненнях. Значної інтенсивності вона досягає при температурах $\sim 10^3\text{—}10^4\text{К}$, наприклад в полум'ї, при дуговому розряді. Ступінь термічної іонізації газу як функцію його температури і тиску можна оцінити використовуючи формулу Саха

$$\frac{a^2}{(1-a^2)} = \frac{2g_i}{g_a} \left(\frac{2\pi m}{h^2} \right)^{3/2} \frac{kT^{5/2}}{p} e^{-\frac{W_i}{kT}},$$

де T — абсолютна температура, p — тиск газу, W_i , — енергія іонізації його атомів, g_a і g_i — статистична вага нейтрального атома і іона, m — маса електрона, k — постійна Больцмана, h — постійна Планка.

Формула справедлива лише приблизно, оскільки при її записі передбачається наявність тільки трьох сортів частинок: (нейтральних атомів, одноразово заряджених іонів і електронів) і не враховуються багатократна іонізація, збудження атомів і присутність домішок.

Окрім утворення позитивних іонів при іонізації газу можливо виникнення негативних іонів. Для того, щоб негативний іон існував і був стійкий, його внутрішня енергія E_i повинна бути менше, ніж енергія нормального стану пари атом – вільний електрон E_0 . Різниця $A = E_0 - E_i$ називається *спорідненістю* атома до електрона. У атомах із заповненою зовнішньою електронною оболонкою (інертні гази He, Ne, Ar, Xe, Kr,...) електронна оболонка екранує ядро і вірогідність утворення негативних іонів мала. Атоми з неповними зовнішніми оболонками (F, Cl, K, Na...), у яких оболонки найближче до заповнення, утворюють найбільш стійкі негативні іони. Спорідненість цих атомів достатньо велика: $A_{F^-} = 3.4\div 3.6$ еВ, $A_{Cl^-} = 3.82$ еВ. Якщо електрон до зіткнення мав кінетичну енергію E_K то при його захопленні повинна звільнитися енергія $A + E_K$. Ця енергія може звільнитися через випромінювання:

$e + a \rightarrow a^- + h\nu$, але вірогідніший процес утворення негативного іона в результаті зіткнення трьох тіл $X+Y+e \rightarrow X^+ + Y + e$ або $X+Y \rightarrow X^+ + Y$.

У разі припинення дії енергії іонізації W іонізованому газі відбувається зворотний процес утворення нейтральних атомів або молекул з вільних електронів і позитивних атомних або молекулярних іонів. Цей процес називається **рекомбінацією**. Рекомбінація приводить до практично повного зникнення заряджених частинок за відсутності протидіючих їй чинників. Атоми і молекули при рекомбінації утворюються не тільки в основному, але і в збуджених станах. Енергія W , яка виділяється в акті рекомбінації (за вирахуванням кінетичної енергії частинок, що рекомбінують), може бути різною. Рекомбінація характеризується коефіцієнтом рекомбінації α , який будучи помножений на добуток концентрацій зарядів, визначає інтенсивність рекомбінації (швидкість зникнення заряджених частинок).

При рекомбінації з випромінюванням W кінетична енергія E захопленого електрона виділяється у вигляді енергії кванта електромагнітного випромінювання: $A^+ + e \rightarrow A^* + h\nu$ (A^+ — одноразово заряджений іон, e — електрон, h — постійна Планка, ν — частота випромінювання; знак $*$ вказує, що атом A може опинитися у збудженому стані).

Рекомбінація позитивних атомних іонів без випромінювання (діелектронна рекомбінація) можлива, якщо у атома A є дискретні рівні енергії, що перевищують нормальну енергію його іонізації. Рекомбінація при захопленні електрона на такий рівень стійка лише в тому випадку, якщо електрон достатньо швидко переходить після захоплення на нижчий рівень (наприклад, з випромінюванням).

Рекомбінація позитивного іона з електроном може відбуватися за участю третьої частинки з переходом W в кінетичну енергію: $A^+ + e + B \rightarrow A + B$. У плазмі з невисокою концентрацією іонів і електронів третьою частинкою може бути атом або молекула, в плазмі з високим ступенем іонізації — також позитивний іон або другий електрон.

1.4.2 Класифікація електричних розрядів в газі

Електричний розряд в газах – проходження електричного струму через газове середовище під дією електричного поля, що супроводжується зміною стану газу. Залежно від умов, що визначають початковий стан газу (склад, тиск), зовнішніх дій на газ, форм, матеріалу і розташування електродів, геометрії виникаючого в газі електричного поля і т.і. призводить до того, що існує цілий ряд видів електричних розрядів в газових середовищах.

Класифікація електричних розрядів в газових середовищах приведена на рис 2.6. Цифри на схемі поряд з видом розряду указують види іонізації, які викликають і підтримують розряд (1 – термічна іонізація, 2 – іонізація випромінюванням (фотоіонізація), 3 – іонізація електронним ударом, 4 – вторинна електронна емісія з катода, 5 – термоелектронна емісія).

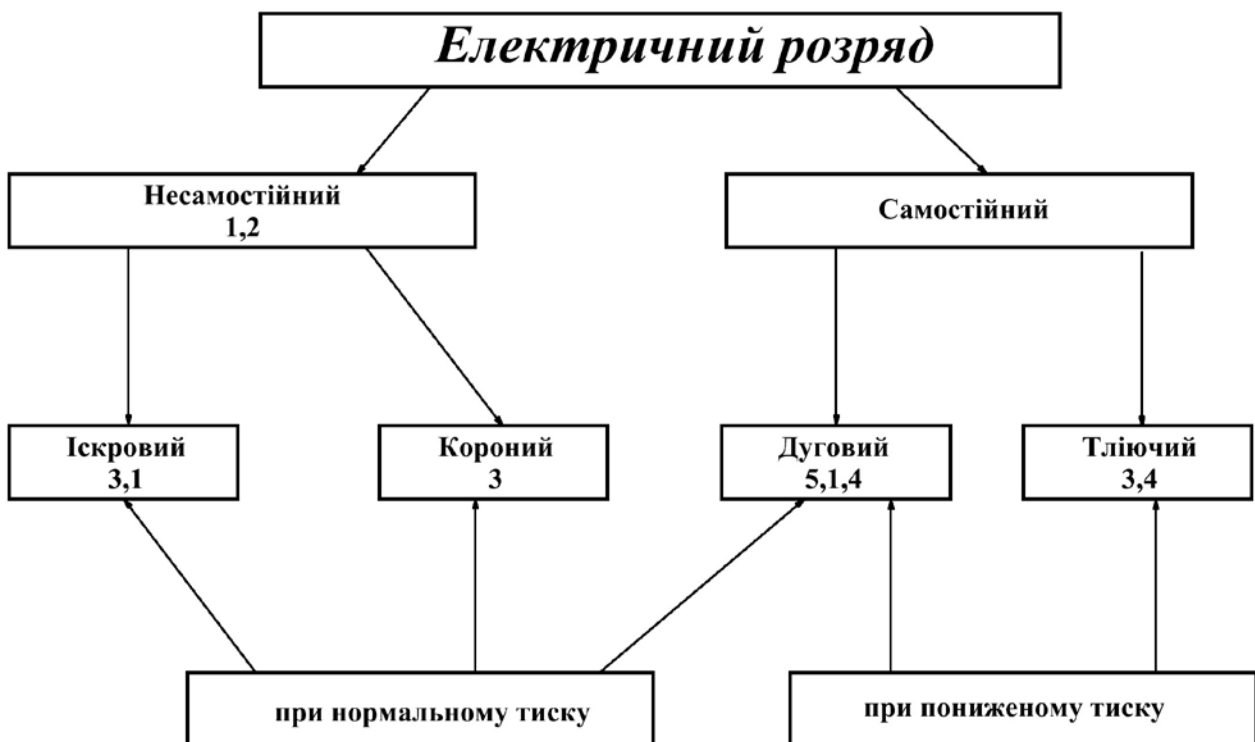


Рисунок 1.6 – Види розрядів в газі

Залежно від умови здійснення розрізняють самостійні та несамостійні розряди.

Самостійний розряд – розряд, при якому провідність газу підтримується електричним полем без зовнішніх дій. Основним механізмом іонізації газу є іонізація атомів і молекул внаслідок ударної іонізації електронами.

Несамостійний розряд в газі – розряд, при якому провідність газу підтримується за допомогою зовнішнього іонізатора. Зовнішніми іонізаторами можуть служити джерела теплової, оптичної енергії, ультрафіолетові і рентгенівські промені, радіоактивні випромінювання, швидкі електрони або іони. У разі припинення дії зовнішнього іонізатора несамостійний розряд також припиняється.

У свою чергу самостійні розряди в газі діляться на розряди, які відбуваються в газі при нормальному тиску газу, або зниженому тиску газу.

При нормальному тиску газу відбуваються іскровий, дуговий і коронний розряди, при зниженому тиску газу виникає тліючий розряд.

Залежно від однорідності поля існують розряди, що відбуваються в однорідних (або слабонеоднорідних) полях. До таких розрядів відносяться темновий розряд і тліючий розряд. До розрядів, які відбуваються в сильно неоднорідних полях, відносяться коронний, дуговий і іскровий розряд.

Всі розглянуті вище електричні розряди відбуваються під дією постійної електричної напруги. Проте газові розряди можуть протікати і під дією змінної електричної напруги. Такі розряди мають стаціонарний характер, якщо частота змінної напруги достатньо висока (або, навпаки, настільки низка, що напівперіод змінної напруги у багато разів більше часу встановлення розряду, так що кожен електрод просто поперемінно служить катодом і анодом). Типовим прикладом може служити високочастотний (ВЧ) розряд. ВЧ – розряд може "горіти" навіть за відсутності електродів (безелектродний розряд). Змінне електричне поле створює в певному об'ємі плазму і надає електронам енергію, достатню для того, щоб іонізація компенсувала втрати заряджених частинок унаслідок дифузії і рекомбінації. Зовнішній вигляд і характеристики ВЧ – розрядів залежать від властивостей газу, його тиску, частоти змінного поля і

потужності, що підводиться. Стаціонарний ВЧ – розряд подібний позитивному стовпу тліючого розряду.

1.4.3 Основи теорії пробою в газі

Навіть у відсутності зовнішнього поля в газі виникають з різних причин (іонізація космічним випромінюванням, молекулярні процеси, емісія з поверхонь) заряджені частинки. Якщо до електродів, які знаходяться в об'ємі, заповненому газом, прикладена напруга, то може відбутися пробій газу. Розряд в газі може бути ініційований як прикладеним електричним полем, так і зовнішнім джерелом електричної енергії. Для дослідження електричних параметрів газового розряду використовується схема, приведена на рисунку 1.7.

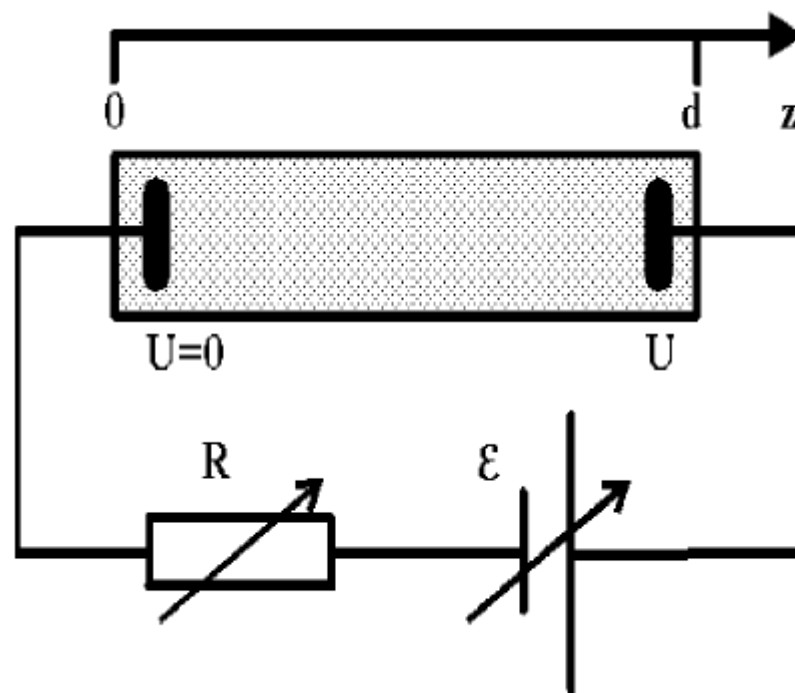


Рисунок 1.7 – Електрична схема для дослідження розрядів в газовому проміжку

Оскільки при частоті прикладеного поля до 100÷1000 Гц характерні часи релаксації набагато менше періоду зміни поля, всі процеси встигають приходити у відповідність з прикладеною напругою, і в кожен момент часу

такий розряд можна розглядати як розряд в однорідному полі. В результаті виникнення електричного поля між електродами окремі вільні електрони, які знаходяться в газі починають рух до електроду (аноду) на який поданий позитивний потенціал.

Електрони на своєму шляху іонізують атоми, «іонізуючу» здатність електронів Таунсенд запропонував характеризувати коефіцієнтом α , названим згодом *першим коефіцієнтом Таунсенду*, рівним числу електронів, що створюються електроном на одиниці довжини пробігу. При такому описі приріст кількості електронів пропорційний α і кількості атомів n :

$$dn(x) = \alpha n dx.$$

Тоді число електронів на відстані x :

$$n_e(x) = n_0 \exp(\alpha x),$$

а перший коефіцієнт Таунсенду:

$$\alpha = (1/n)(dn/dx).$$

Процес виникнення електронів можна також характеризувати *частотою іонізації* Y_i — числом електронів, що створюються одним електроном в одиницю часу:

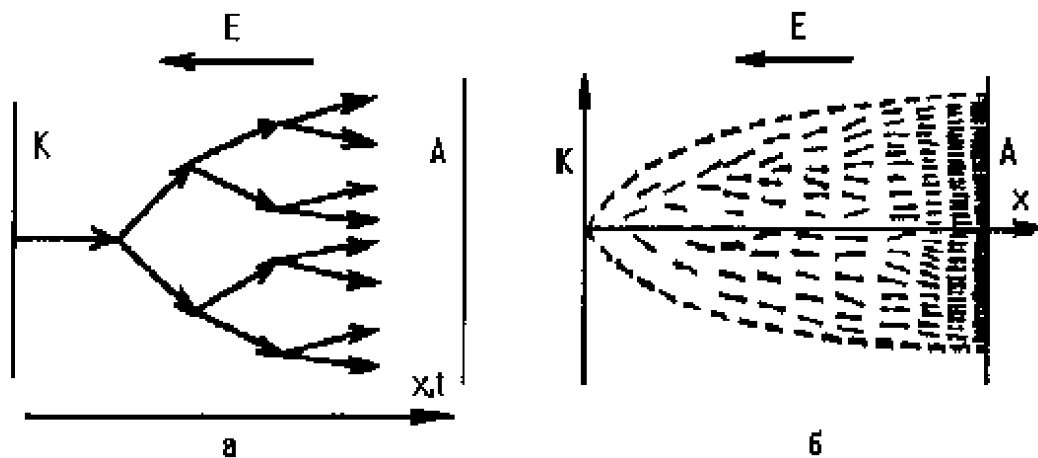
$$Y_i = (1/n)(dn/dt).$$

Тоді частота іонізації пов'язана з першим коефіцієнтом Таунсенду через швидкість дрейфу:

$$Y_i/\alpha = u_d.$$

Всі три величини α , Y_i , u_d залежать від напруженості електричного поля E .

Припустимо, що з катода вилетів один електрон. У сильному полі біля катода він швидко набере енергію, достатню для іонізації атома (молекули) газу. В результаті іонізації з'явиться два повільні електрони (і один іон). Ці електрони так само прискоряться, кожен проведе іонізацію – їх стане чотири – теж прискоряться, іонізують, стане вісім і т.д. – виникає лавина, йде ланцюговий процес (рис. 1.8).



(а) – лавинне розмноження електронів в проміжку між катодом К і анодом А, (б) дифузійне розпливання лавини електронної лавини, народжена від електрона, що вийшов з певного місця катода

Рисунок 1.8 – Схеми утворення лавини в газовому проміжку

На відстані x перший електрон створить $(e^{\alpha x}-1)$ електронних пар. Виникаючі в проміжку електрони дрейфують до анода, іони – до катода. Іони, що приходять на катод, здатні вибивати з катода вторинні електрони. Для опису процесу іонно–електронної емісії Таунсендом був запропонований другий коефіцієнт γ , рівний числу вторинних електронів на один іон (*другий коефіцієнт Таунсенду*), що приходить на катод, і залежний від матеріалу катода, чистоти його поверхні і ін. Звичайно величина γ складає $10^{-4} \div 10^{-2}$. Таким чином, іони що йдуть до катода, прискоряться і виб'ють з катода $\gamma(e^{\alpha x}-1)$

електронів. Навіть якщо це буде всього один вторинний електрон, то процес повториться, так що умовою горіння розряду буде:

$$\gamma(e^{ax}-1)\geq 1.$$

Кожен вторинний електрон також іонізує атоми і породжує $(e^{ax}-1)$ електронів.

Тоді величина μ зветься **коефіцієнтом іонізаційного зростання**.

$$\mu = \gamma(e^{ad}-1)$$

де d – відстань між катодом і анодом

При $\mu < 1$ струм затухатиме, умова $\mu = 1$ є умовою переходу до самостійного розряду (**умова запалення розряду**) і умовою **стаціонарності розряду**. Картина спрощена і ідеалізується, реально електрони зникають (прилипають, рекомбінують, дифундують до стінок). В кінці минулого сторіччя Таундсенд, проаналізувавши величезне число дослідів, встановив експериментальну залежність:

$$a/p = A \exp(-Bp / E),$$

де A і B постійні для даного газу і катода, p — тиск, E — напруженість електричного поля.

Коефіцієнти Таунсенду α і γ мають ту властивість, що відношення a/p і γ не є функцією окремо від напруженості електричного поля E і тиск газу p , а залежить від їх відношення: $a/p = f_1(E/p)$ і $\gamma = f_2(E/p)$. Умова запалення розряду, або умова, що дозволяє визначити **напругу запалення** U_3 має вигляд:

$$f_1\left(\frac{U_3}{pd}\right)\left(\exp\left(f_2\left(\frac{U_3}{pd}\right)\right)-1\right)=1$$

З останнього виразу видно, що напруга запалення U_3 є функцією добутку pd , і при $pd = \text{const}$ напруга запалення не міняється. Ця закономірність носить назву *закон Пашена*. Криві Пашена (рис. 1.9), що відображає залежність U_3 від pd , називають *характеристикою запалення розряду*.

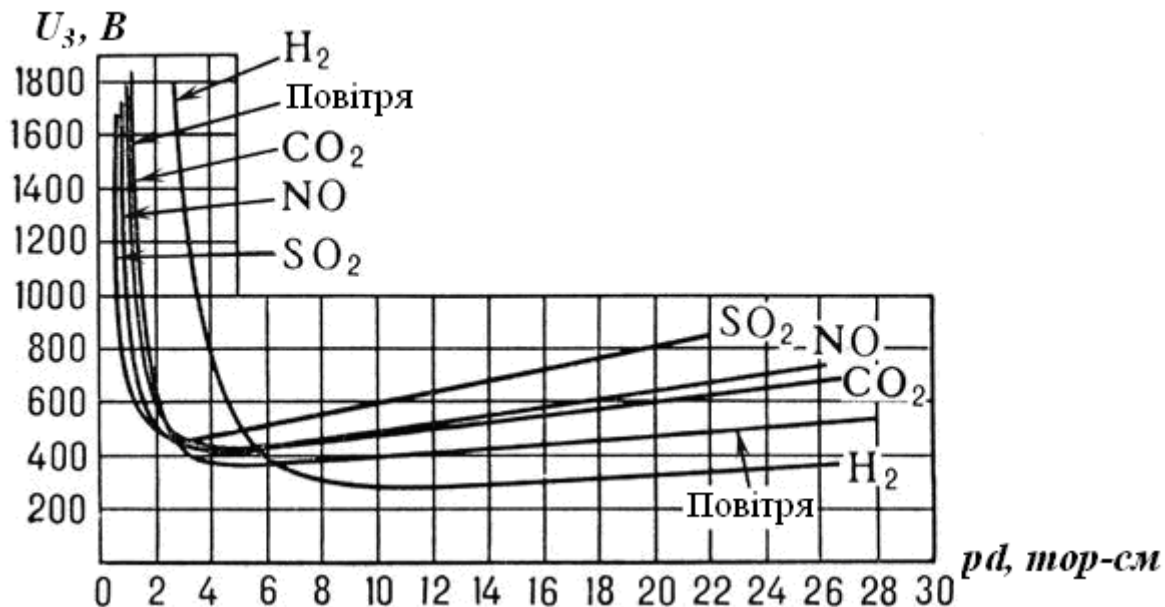


Рисунок 1.9 – Криві Пашена для різних газів

Виражаючи α з умови запалення розряду ($\mu = 1$) знайдемо залежність напруга запалення від pd :

$$U_3 = Bpd / (C + \ln(pd)).$$

Таким чином, на величину напруга запалення значно впливають властивості газу. Видно, що типові значення U_3 у мінімумі складає сотні вольт, а мінімум лежить поблизу значення $pd = 1$ Тор–см.

Підйом кривої при великих значеннях pd пояснюється зменшенням довжини вільного пробігу і зниженням вірогідності набору електроном необхідної для іонізації енергії. Підйом кривої зліва (при малих pd) – зменшенням числа зіткнень на довжині проміжку.

1.4.4 Вольт–амперна характеристика газового розряду

Для дослідження вольт–амперної характеристики газового розряду використовуємо електричну схему, приведену на рис. 1.7. і при деякому постійному значенні струмообмежувального резистора R , будемо збільшувати напругу джерела E .

Оскільки в газі завжди є електрони і іони, що виникають за рахунок іонізації космічним випромінюванням і інших процесів (фонова іонізація), у міру зростання напруги струм в зовнішньому ланцюзі ростиме за рахунок їх дрейфу до електродів (рис. 1.10). Дане явище відповідає ділянці АВ.

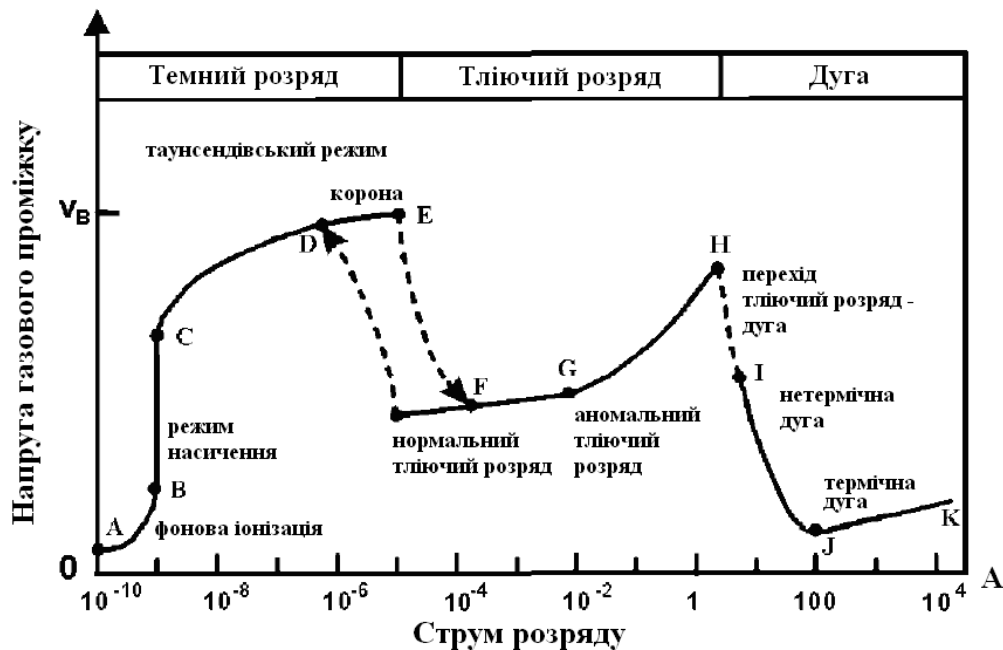


Рисунок 1.10 – Вольт–амперна характеристика електричного розряду постійного струму

При подальшому підвищенні напруги поле в проміжку росте, і збирає всі заряди на електроди, що позначено як режим насичення (ділянка BC). Очевидно, що якщо є зовнішнє джерело, іонізуюче газ (або що викликає емісію електронів з катода), то пряма BC зміститься управо. Режим насичення використовують в іонізаційних камерах для вимірювання потужності джерела іонізуючого випромінювання. Ці два режими несамостійного розряду характеризуються відсутністю лавини в газовому проміжку і малими струмами.

При подальшому збільшенні напруги джерела росте коефіцієнт іонізаційного нарощування μ , в наслідок чого виникає підсилення струму в газовому проміжку (генерація лавини), хоча розряд як і раніше залишається несамотійним. Ця частина (ділянка CE) вольт-амперної характеристики також зростає. Коефіцієнт іонізаційного наростання μ (газове підсилення) росте із зростанням напруги на проміжку. Чим слабкіше джерело зовнішньої іонізації, тим вище лежить точка C. Поблизу точки E поле в проміжку починається спотворюватися просторовим зарядом, в наслідок чого, розряд переходить в стримерний (лавинний) режим, що приводить до переходу в самотійний розряд (ділянка EF). Ділянка AE носить загальну назву “*Темний розряд*”, оскільки в процесі розряду практично відсутнє оптичне випромінювання (свічення) в газовому проміжку. Практично вся напруга джерела на цій ділянці прикладена до розрядного проміжку. Слід зазначити, що якщо на якому-небудь електроді є підсилення поля (вістря), то на ділянці DE може сформуватися коронний розряд, який також при подальшому зростанні напруги переходить в самотійний розряд.

Після досягнення газового підсилення проміжку, рівного одиниці, розряд стає самотійним і не вимагає для своєї підтримки зовнішнього іонізатора. Струм в газовому проміжку зростає, опір проміжку стає порівнянним з опором зовнішнього ланцюга R , внаслідок чого напруга на проміжку падає. Подальше збільшення струму можна здійснювати або піднімаючи напругу джерела, або зменшуючи опір резистора. В результаті спочатку виникає “нормальний тліючий розряд” з майже постійною напругою в широкому діапазоні струмів (ділянка FG), а, починаючи з деякої величини розрядного струму, напруга на газовому проміжку починає зростати. Цю гілку характеристики називають “аномальним тліючим розрядом” (ділянка GH). У точці H напруга знову падає, і виникає спочатку нетермічний дуговий розряд (ділянка IJ), а потім – термічний (ділянка JK).

1.4.5 Несамостійні газові розряди

До несамостійних газових розрядів відносяться темний (таундсеновський) розряд, коронний і іскровий розряд.

Темний (таундсеновський) розряд

«Темний розряд» розвивається, коли іонізація газу відбувається при безперервній дії зовнішнього іонізатора і малому значенні різниці потенціалів між анодом і катодом в газовому проміжку. При підвищенні різниці потенціалів (напруги) сила струму тихого розряду спочатку збільшується пропорційно напрузі (ділянка кривої OA на рис. 1.11).

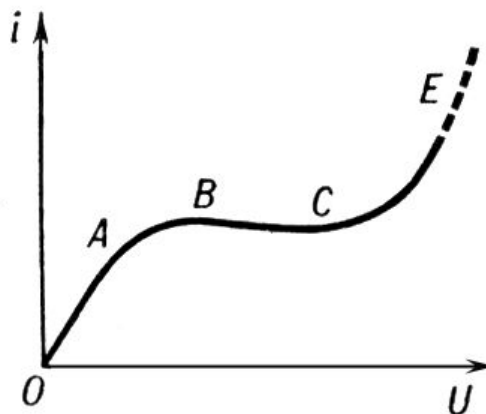


Рисунок 1.11 – Вольт–амперна характеристика темного розряду

Потім зростання струму із зростанням напруги сповільнюється (ділянка кривої AB), і коли всі заряджені частинки, що виникли під дією іонізатора в одиницю часу, йдуть за той же час на катод і на анод, збільшення струму із зростанням напруги не відбувається (ділянка BC); при такій напруженості поля в газовому проміжку енергія іонізованих атомів мала, що є обумовлює відсутність випромінювання в оптичному діапазоні при поверненні іонізованих частинок в початковий стан.

При подальшому збільшенні напруги електронам надається енергія, яка достатня для розвитку електронної лавини, і розряд переходить в стадію лавинного або стримерного пробою.

Коронний розряд

Коронний розряд виникає здебільшого в сильно неоднорідних або змінних в часі полях, наприклад біля загострених і викривлених поверхонь провідників і електродів. Величина напруженості поля і ступінь його неоднорідності поблизу таких тіл такі великі, що відбувається ударна іонізація електронами молекул газу.

При коронному розряді іонізація не приводить до пробою, тому що сильна неоднорідність електричного поля, що обумовлює її, існує тільки в безпосередній близькості від дрітків і остріїв. При коронному розряді ці електроди оточені характерним свіченням, що також одержало назву корони, або коронуючого шару. Область міжелектродного простору, що примикає до корони і не світиться («темна»), називається зовнішньою зоною. Коронний розряд є процесом поджигу, що багато разів повторюється, і розповсюджується на обмежену відстань від провідника – до області, де напруженість поля вже недостатня для підтримки розряду.

Коронний розряд може мати місце при різному тиску газу в розрядному проміжку, але найвиразніше він виявляється при тиску не нижче за атмосферне. Розряд починається, коли напруга U між електродами досягає так званого «початкового потенціалу» корони U_0 (типові значення – тисячі і десятки тисяч *вольт*). Струм коронного розряду пропорційний різниці $U - U_0$ і рухливості іонів газу, що утворюються в розряді. Його величина звичайно невелика (долі *ма* на 1 *см* довжини коронуючого електроду). При підвищенні U яскравість і товщина коронуючих шарів ростуть.

Якщо коронує тільки анод, то корона називається позитивною. В цьому випадку первинні електрони вивільняються на зовнішній межі шару, який

коронує в результаті фотоіонізації газу фотонами, які випускаються усередині корони. Прискорюючись в полі анода, ці електрони ударами зрушують атоми і іони газу і в актах ударної іонізації породжують електронну лавину. У зовнішній зоні носіями струму є позитивні іони; утворений ними позитивний просторовий заряд обмежує струм коронного розряду.

У негативній короні позитивні іони, прискорені сильним полем поблизу катода який коронує, вибивають з нього електрони (*вторинна електронна емісія*). Вилетівши з катода, електрони ударами іонізують газ, породжує лавину і забезпечуючи відтворення позитивних іонів. У чистих електропозитивних газах струм в зовнішній зоні переноситься електронами, а у присутності електронегативних газів, – негативними іонами, що виникають при «злипанні» електронів і нейтральних молекул газу. Ці електрони або іони утворюють в зовнішній зоні негативний просторовий заряд, що обмежує струм коронного розряду.

У двухполярній короні коронують обидва електроди. Процеси в шарах, які коронують аналогічні розглянутим вище, тобто в зовнішній зоні струм переноситься стрічними потоками позитивних іонів і електронів (або негативних іонів).

При періодичній зміні полярності електродів (коронний розряд змінного струму) малорухливі важкі іони в зовнішній зоні не встигають досягти електродів за час одного напівперіоду, і виникають коливання просторового заряду; коронний розряд на частотах близько 100 кГц і вище називається високочастотною *короною*.

У коронному розряді електрична енергія перетворюється головним чином в теплову – в зіткненнях іони віддають енергію свого руху нейтральним молекулам газу. Цей механізм викликає значні втрати енергії на високовольтних лініях передач. Корисне застосування коронний розряд знайшов в процесах електричної сепарації (наприклад, в електричних фільтрах очищення газів), електричного забарвлення (зокрема, для нанесення

порошкових покриттів), а також при реєстрації іонізуючого випромінювання (лічильниками Гейгера – Мюллера).

Іскровий розряд

Іскровий розряд – одна з форм електричного розряду в газах, який виникає звичайно при тиску порядку атмосферного і супроводжується характерним звуковим ефектом — «тріском» іскри. Іскровий розряд у власному сенсі цього терміну відбувається, якщо потужність живлячого його джерела енергії недостатня для підтримки стаціонарного дугового розряду або тліючого розряду. В цьому випадку одночасно з різким зростанням розрядного струму напруга на розрядному проміжку протягом дуже короткого часу (від декількох *мксек* до декількох сотень *мксек*) падає нижче за напругу згасання іскрового розряду, що приводить до його припинення. Потім різниця потенціалів між електродами знов росте, досягає напруги запалення іскрового розряду і процес повторюється. В інших випадках, коли потужність джерела енергії достатньо велика, також спостерігається вся сукупність явищ, характерних для іскрового розряду, але вони є лише перехідним процесом, що веде до встановлення розряду іншого типу – частіше за всього дугового.

Іскровий розряд є пучком яскравих, швидко зникаючих або ниткоподібних, часто сильно розгалужених, смужок – іскрових каналів. Ці канали заповнені плазмою, до складу якої в потужному іскровому розряді входять не тільки іони початкового газу, але і іони речовини електродів, розряду, що інтенсивно випаровується під дією. Механізм формування іскрових каналів (і, отже, виникнення іскрового розряду) пояснюється стримерною теорією електричного пробою газів. Згідно з цією теорією електронної лавини, що виникає в електричному полі розрядного проміжку, за певних умов утворюються стримери – тонкі розгалужені канали, що тьмяно світяться, які містять іонізовані атоми газу і відщеплені від них вільні електрони. Стримери, подовжуючись, перекривають розрядний проміжок і з'єднують електроди

безперервними провідними нитками. Перетворення стримерів в іскрові канали супроводжується різким зростанням сили струму і кількості енергії, що виділяється в них. Кожен канал швидко розширюється, в ньому стрибкоподібно підвищується тиск, внаслідок чого на його межах виникає ударна хвиля. Сукупність ударних хвиль від іскрових каналів, що розширюються, породжує звук, що сприймається як «тріск» іскри.

Величини, що характеризують іскровий розряд (напруга запалення, напруга згасання, максимальна сила струму, тривалість), можуть мінятися в широких межах залежно від параметрів розрядного ланцюга, величини розрядного проміжку, геометрії електродів, тиску газу і т.д. Напруга запалення іскрового розряду, як правило, достатньо велика і визначається законом Пашена. Градієнт напруги в іскрі знижується від декількох десятків *кВ/см* у момент пробію до ≈ 100 *в/см* через декілька мікросекунд. Максимальна сила струму в потужному іскровому розряді може досягати значень близько декількох сотень *кА*.

Іскровий розряд знайшов різноманітні застосування в техніці. З його допомогою ініціюють вибухи і процеси горіння, вимірюють високі напруги; його використовують в спектроскопічному аналізі, в перемикачах електричних ланцюгів, для високоточної обробки металів.

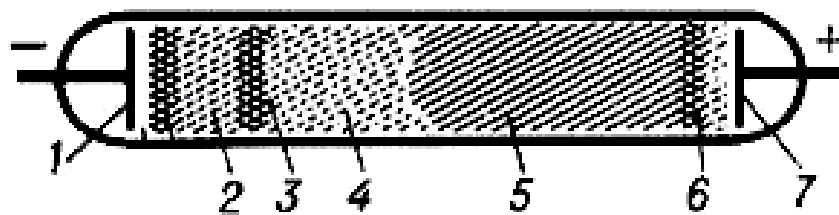
1.4.6 Самостійні газові розряди

До самостійних газових розрядів відносяться тліючий і дуговий розряди.

Тліючий розряд

Тліючий розряд є одним з основних типів газового розряду, який формується при низькій температурі катода, низькому тиску газу і малому розрядному струмі.

Тліючий розряд може виникати при тиску p газу аж до атмосферного, проте переважна більшість досліджень тліючого розряду проведена при тиску p від сотих доль до декількох *мм. рт. ст.* Електрони з катода тліючого розряду вилітають головним чином під дією ударів позитивних іонів і швидких атомів (і частково – за рахунок фотоефекту і енергії метастабільних атомів). Зовнішній вигляд тліючого розряду в довгій циліндровій трубці при тиску порядку десятих доль *мм. рт. ст.* і вище має характерну наявність ряду областей, що візуально сильно відрізняються одна від одної (рис. 1.12).



1 — катод, 2 — катодний темний простір, 3 — катодне (негативне, тліюче) свічення, 4 — фарадеев темний простір, 5 — позитивний стовп, 6 — анодна область, 7 — анод.

Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд нормального тліючого розряду

Головні чотири області розрядного простору, характерні для тліючого розряду, це: 2 — катодний темний простір; 3 — тліюче свічення; 4 — фарадеев темний простір; 5 — позитивний стовп. Області 2 — 4 знаходяться поблизу катода і утворюють катодну частину розряду, в якій відбувається різке падіння потенціалу (катодне падіння), пов'язане з великою концентрацією позитивних іонів на межі областей 2—3. У області 3 електрони, прискорені у області 2, проводять інтенсивну ударну іонізацію.

Походження цих областей пояснюється особливостями елементарних процесів іонізації і збудження атомів і молекул. Найважливішою з них, що визначає саме існування тліючого розряду за вказаних умов, є катодний темний простір, в якому в результаті ударної іонізації електронами утворюються позитивні іони, що забезпечують емісію електронів з катода.

Тліюче свічення обумовлене рекомбінацією іонів і електронів в нейтральні атоми або молекули. Позитивний стовп тліючого розряду в наслідок постійної і великої концентрації електронів в ньому характеризується: незначним падінням потенціалу в ньому; свіченням, яке викликається поверненням збуджених молекул (атомів) газу в основний стан; великою електропровідністю.

Стаціонарність процесів в позитивному стовпі пояснюється взаємною компенсацією процесів утворення і втрат заряджених частинок. Утворення таких частинок відбувається при іонізації атомів і молекул в результаті зіткнень з ними електронів. До втрат заряджених частинок приводить амбіполярна дифузія до стін судини, що обмежують розрядний об'єм, і наступна за цим рекомбінація. Дифузійні потоки, направлені не до стінок, а уздовж розрядного струму, часто ведуть до отримання в позитивному стовпі своєрідних «шарів» (звичайно рухомих). При збільшенні розрядного струму звичайний тліючий розряд стає аномальним і починається стягання (контракція) позитивного стовпа. Стовп відривається від стінок об'єму, в ньому починає відбуватися додатковий процес втрати заряджених частинок (рекомбінація в об'ємі). Передумовою цього є висока щільність заряджених частинок.

Напруга між електродами тліючого розряду (напруга горіння) залежить в основному від двох параметрів: добутку p на відстань l між електродами ($p \times l$) і щільність струму на катоді j . Загальна класифікація різних форм тліючого розряду була встановлена в дослідженнях вченого Б.Н.Клярфельда і його учнів. Вона розповсюджується на випадок дуже малих значень $p l$ і j , коли в просторі між електродами відсутній просторовий заряд і поле практично однорідно. У такому, по термінології Клярфельда, простому тліючому розряді відсутні згадані вище окремі області і газ іонізується електронами у всьому проміжку між електродами. При збільшенні $p l$ і j можливо існування двох форм тліючого розряду – нормального і щільного. У першому з них електрони емітує тільки частина поверхні катода. При цьому j і U залишаються постійними, а із зростанням струму емісія відбувається зі все більшої площі катода. Щільний

тліючий розряд спостерігається при великих значеннях j . Для нього характерний різке зростання напруги горіння із зростанням струму в газовому проміжку.

Особливою формою тліючого розряду є розряд з порожнистим катодом (катод має форму порожнистого циліндра або двох паралельних пластин). У такому тліючому розряді електрони, що багато разів коливаються між стінками катода, інтенсивно іонізують газ. Тліючий розряд з порожнистим катодом відрізняється від звичайного тліючого розряду великою щільністю струму і яскравістю свічення. Властивості і характеристики тліючого розряду використовуються в техніці (наприклад, стабілітрони, тиратрони тліючого розряду).

Дуговий розряд

При збільшенні розрядного струму звичайний тліючий розряд стає аномальним (рис. 1.9) і починається стягання (контракція) позитивного стовпа. Стовп відривається від стінок, в ньому починає відбуватися додатковий процес втрати заряджених частинок (рекомбінація в об'ємі). Передумовою цього є висока щільність заряджених частинок. При подальшому підвищенні розрядного струму газ нагрівається настільки, що стає можливою його термічна іонізація. Зіткнення між атомами або молекулами в цьому випадку такі сильні, що відбувається відщеплення електронів. Такий розряд називається дуговим розрядом. Із зростанням струму електропровідність стовпа підвищується, вольт–амперна характеристика дугового розряду набуває падаючого характеру (рис. 1.9). Слід зазначити, що дуговий розряд може «горіти» у широкому діапазоні тиску газу, в більшості випадків дуговий розряд спостерігається при тиску порядку атмосферного.

Формуванню дугового розряду передуює короткий нестационарний процес в газовому просторі між електродами – розрядному проміжку. Тривалість цього процесу (час встановлення дугового розряду) звичайно $\sim 10^{-6}—10^{-4}$ сек залежно

від тиску і роду газу, довжини розрядного проміжку, стану поверхонь електродів і т.д. Дуговий розряд одержують, іонізуючи газ в розрядному проміжку (наприклад, за допомогою допоміжного, так званого запалювального електроду). У інших випадках для отримання дугового розряду розігрівають один або обидва електроди до високої температури або розсовують зімкнуті на короткий час електроди. Дуговий розряд може також виникнути в результаті електричного пробоя розрядного проміжку при короткочасному різкому підвищенні напруги між електродами. Якщо пробій відбувається при тиску газу, близькому до атмосферного тиску, то нестационарний процесу цьому випадку, є іскровим розрядом.

Для дугового розряду характерна надзвичайна різноманітність форм, що приймаються їм: він може виникати практично при будь-якому тиску газу — від менш 10^{-5} мм рт. ст. до сотень атм; різниця потенціалів між електродами дугового розряду може приймати значення від декількох вольт до декількох тисяч вольт (високовольтний дуговий розряд). Дуговий розряд може протікати не тільки при постійному, але і при змінній напрузі між електродами. Проте термін напівперіоду змінної напруги звичайно набагато більше часу встановлення дугового розряду, що дозволяє розглядати кожен електрод протягом одного напівперіоду як катод, а в наступному напівперіоді — як анод. Характерними особливостями всіх форм дугового розряду (тісно пов'язаними з характером емісії електронів з катода в цьому типі розряду) є мала величина катодного падіння і висока щільність струму на катоді. Катодне падіння в дуговому розряді звичайно дорівнює порядку іонізаційного потенціалу робочого газу або ще нижче ($1 \div 10$ в); щільність струму на катоді складає $10^2 \div 10^7$ а/см². При такій великій щільності струму сила струму в дуговому розряді звичайно також велика — порядку $1 \div 10$ а і вище, а в деяких формах дугового розряду досягає багатьох сотень і тисяч ампер. Проте існують дугові розряди з малою силою струму (наприклад, в газотроні з ртутним катодом може горіти при струмах $0,1$ а і нижче).

Корінна відмінність дугового розряду від інших типів стаціонарного електричного розряду в газі полягає в характері елементарних процесів, що відбуваються на катоді і в області біля катода. Якщо в тліючому розряді і негативному коронному розряді має місце вторинна електронна емісія, то в дуговому розряді електрони вилітають з катода за рахунок термоелектронної або і автоелектронної емісії. Коли в дуговому розряді відбувається тільки перший з цих процесів, його називають термоемісійним. Інтенсивність термічної емісії визначається температурою катода; тому для існування термоемісійного дугового розряду необхідно, щоб катод або окремі його ділянки були розігріті до високої температури. Таке розігрівання здійснюють, нагріваючи катод від допоміжного джерела енергії. Термоемісійний дуговий розряд виникає і у тому випадку, коли температуру катода достатньою мірою підвищують удари позитивних іонів, що утворюються в розрядному проміжку і прискорюваних електричним полем у напрямку до катода. Проте частіше при дуговому розряді без штучного нагріву інтенсивність термоелектронної емісії дуже мала для підтримки розряду, і значну роль грає процес автоелектронної емісії. Поєднання цих двох видів емісії носить назву термоавтоемісії.

Несамостійним називається дуговий розряд з штучним підігрівом катода, оскільки підтримку такого розряду не можна здійснити за рахунок його власної енергії (при виключенні зовнішнього джерела напруження він гасне). Розряд легко запалюється без допоміжних запалювальних електродів. Підвищення напруги такого дугового розряду спочатку підсилює його струм до величини, визначуваною інтенсивністю термоелектронної емісії з катода при даній температурі нагріву. Потім аж до деякої критичної напруги струм залишається майже постійним (так званий вільний режим). Коли напруга перевищує критичну, характер емісії з катода міняється: істотну роль в ній починають грати фотоефект і вторинна електронна емісія (енергія позитивних іонів стає достатньою для вибивання електронів з катода). Це приводить до різкого зростання струму розряду – він переходить в стаціонарний режим.

За певних умов дуговий розряд з штучним підігрівом продовжує стійко горіти, коли напругу між електродами знижують до значень, менших не тільки іонізаційного потенціалу робочого газу, але і найменшого його потенціалу збудження. Цю форму дугового розряду називають низьковольтною дугою. Її існування обумовлене виникненням поблизу катода максимуму потенціалу, що перевищує потенціал анода і близького до першого потенціалу збудження газу, внаслідок чого стає можливою ступінчаста іонізація.

Підтримка самостійного дугового розряду здійснюється за рахунок енергії самого розряду. На тугоплавких катодах (вольфрам, молібден, графіт) самостійний дуговий розряд носить чисто термоемісійний характер – бомбардування позитивними іонами нагріває катод до дуже високої температури. Речовина легкоплавкого катода інтенсивно випаровується при дуговому розряді; випаровування охолоджує катод, і його температура не досягає значень, при яких розряд може підтримуватися однією термоелектронною емісією – разом з нею відбувається автоелектронна емісія.

Самостійний дуговий розряд може існувати як при вкрай малому тиску газу (так звані вакуумні дуги), так і при високому тиску. Плазму самостійного дугового розряду низького тиску відрізняє неїзотермічність: іонна температура лише ненабагато перевищує температуру нейтрального газу в просторі, що оточує область розряду, тоді як електронна температура досягає десятків тисяч градусів, а у вузьких трубках і при великих струмах – сотень тисяч. Пояснюється це тим, що більш рухомі електрони, одержуючи енергію від електричного поля, не встигають передати її важким частинкам в рідких зіткненнях.

У дуговому розряді високого тиску плазма ізотермічна (точніше – квазіізотермічна, оскільки, хоча температури всіх компонент рівні, температура в різних ділянках стовпа в дуговому розряді не однакова). Ця форма дугового розряду характеризується значною силою струму (від 10 до 10^3 а) і високою температурою плазми (порядку 10^4 К). Найбільші температури в такому дуговому розряді досягаються при охолодженні дуги потоком рідини або газу

– канал струму «охоплюваної дуги» стає тоншим і при тій же величині струму нагрівається сильніше. Саме цю форму дугового розряду називають електричною дугою — під дією направлених ззовні або конвекційних, викликаних самим розрядом, потоків газу канал струму дугового розряду згинається.

Самостійний дуговий розряд на легкоплавких катодах відрізняється тим, що термоавтоемісія електронів відбувається в ньому лише з невеликих ділянок катода – так званих катодних плям. Малі розміри цих плям (менш 10^{-2} см) обумовлені пінч-ефектом – стяганням каналу струму його власним магнітним полем. Щільність струму в катодній плямі залежить від матеріалу катода і може досягати десятків тисяч a/cm^2 . Тому в катодних плямах відбувається інтенсивна ерозія – з них вилітають струмені пари речовини катода із швидкістю порядку 10^6 см/сек. Катодні плями утворюються і при дуговому розряді на тугоплавких катодах, якщо тиск робочого газу менше 10^2 мм рт. ст. При вищому тиску термоавтоемісійний дуговий розряд з катодними плямами, що хаотично переміщаються по катоду, переходить в термоемісійний дуговий розряд без катодної плями.

Дуговий розряд широко застосовується в *дугових печах* для виплавки металів, в *газорозрядних джерелах світла*, при *електричній зварці металів*, служить джерелом плазми в *плазмотронах*. Різні форми дугового розряду виникають в газонаповнених і вакуумних перетворювачах електричного струму (ртутних *вентильях*, газових і вакуумних *комутаторах* і т.п.). Дуговий розряд з штучним підігрівом катода використовується в *люмінесцентних лампах*, *газотронах*, *тиристорних* джерелах і джерелах електронних пучків.

1.5 Газорозрядні прилади

Газорозрядними приладами називаються пристрої, простір між електродами яких заповнений газом (паром) і рух заряджених частинок (електронів і іонів) відбувається при іонізації останнього.

Конструктивно газорозрядні прилади є системою з двох і більш електродів, поміщених в герметичний скляний або металевий балон, який звичайно заповнюють інертним газом (гелій, аргон, неон, криптон, водень) або парами ртуті.

Газорозрядні прилади можна розділити по можливості управління на: некеровані (газотрони, стабілітрони) і керовані (тиратрони).

По типу катодів газорозрядні прилади розрізняють на прилади з холодним (не нагрітим) катодом і прилади з гарячим (нагрітим) катодом.

1.5.1 Некеровані газорозрядні прилади

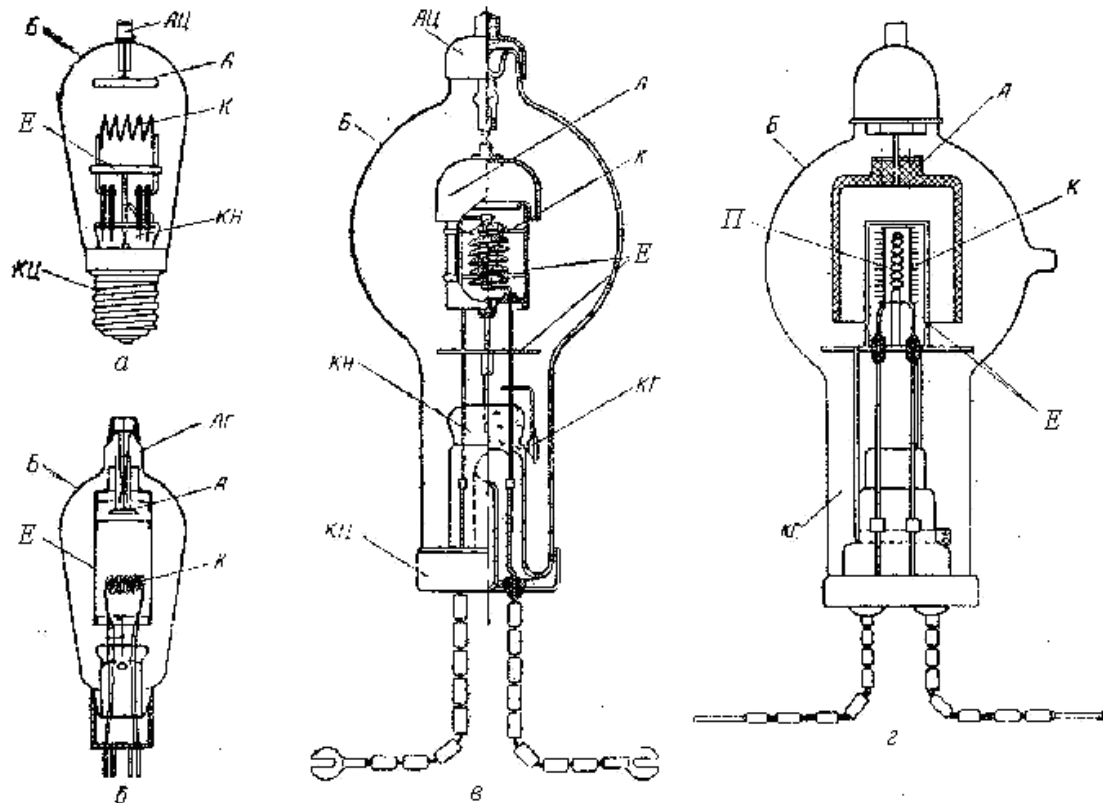
До некерованих газорозрядних приладів відносяться газотрони, стабілітрони, а також індикаторні газорозрядні прилади.

Газотрони

Газотроном називається некерований вентиль з несамостійним дуговим або самостійним тліючим розрядом в інертних газах або парах ртуті, призначений для випрямлення змінного струму промислової частоти.

Конструктивно газотрон є скляним балоном, наповненим парами ртуті або інертними газами під низьким тиском (від тисячних доль до декількох мм. рт. ст.), з двома електродами: анодом і підігрівним катодом. Існує декілька типових конструкцій (рис 1.13) газотронів:

- відкрита,
- екранована,
- напівзакрита,
- закрита.



а – відкрита; б – екранована; в – напівзакрита; г – закрита

А – анод; АЦ – анодний цоколь; АГ – анодна горловина; К – катод; КЦ – катодний цоколь; КГ – катодна горловина; КН – катодна ніжка; Е – екран; Б – балон; П – підігрівач

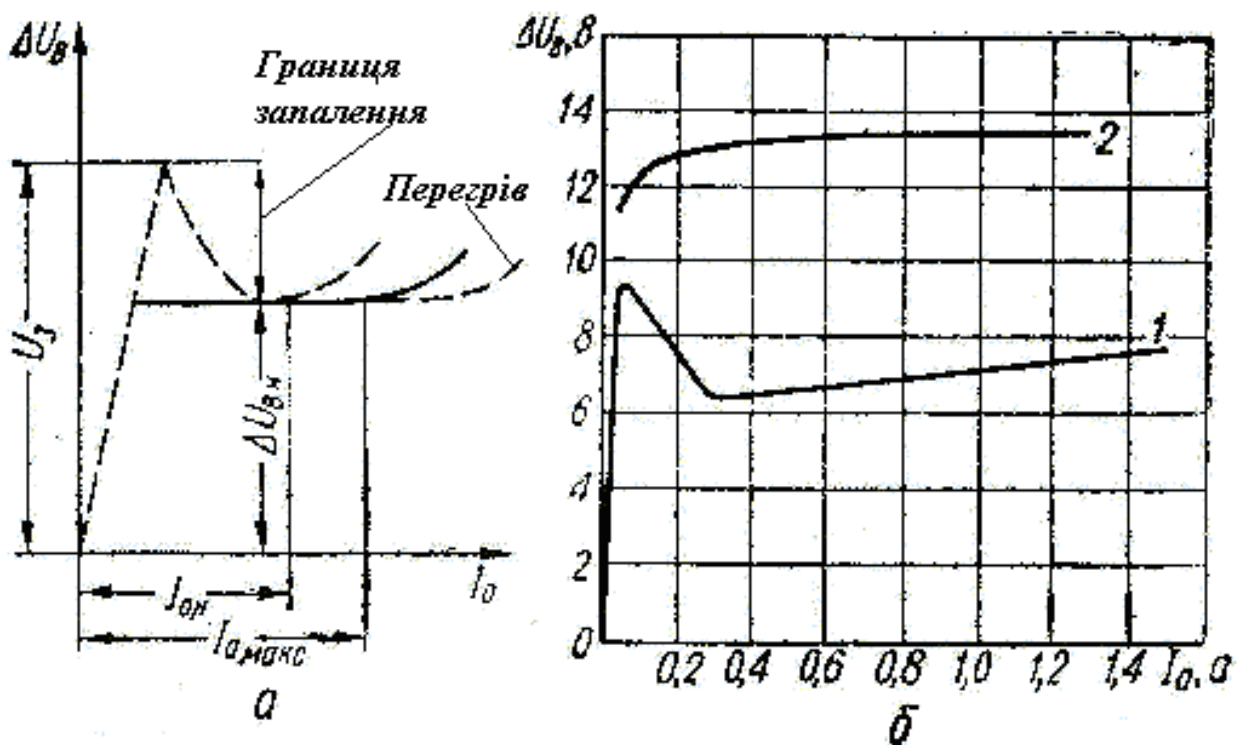
Рисунок 1.13 – Типові конструкції газотронів

У газотронах малої і середньої потужності застосовуються оксидні катоди прямого напруження. У газотронах великої потужності – катоди непрямого нагріву (підігрівні катоди). У низьковольтних газотронах катоди виготовлені з торійованого молібдену. У деяких газотронах катод нікелевий, активований сумішшю вуглекислих солей барію, стронцію і кальцію. Катод, як правило, поміщають в металевий (тепловий) екран для полегшення теплового режиму роботи. Для запобігання руйнуванню оксидного катода газотронів включення

високої напруги допустимо лише після повного прогрівання катода. Матеріалом для анодів служить нікель або графіт.

Випрямляюча дія газотрона обумовлена тим, що при позитивному напівперіоді змінної напруги на аноді, запалення газотрона, що перевищує напругу, між анодом і катодом виникає несамостійний дуговий розряд, який підтримується невеликою напругою горіння ($10 \div 30$ в), а при негативному напівперіоді анод знаходиться під максимальною напругою, що випрямляється, і струм в газотроні практично відсутній. Напруга горіння мало залежить від величини струму, який для різних малопотужних газотронів коливається в межах $0,01 \div 0,5$ а, а для потужних газотронів складає $15 \div 150$ а. Внаслідок незначного падіння напруги (напруга горіння) при дуговому розряді випрямлячі з газотронами мають високий к.к.д. ($95 \div 99\%$).

Вольт–амперні характеристики газотрона приведені на рисунку 2.14.



а – катод газотрона з торійованого молібдену; б – оксидний катод; 1 – ртутне наповнення газотрона; 2 – наповнення інертним газом

Рисунок 1.14 – Вольт–амперні характеристики газотрона

У газотронах з середньою і низькою робочою напругою (до 1000В) потенціал запалення U_z перевищує падіння напруги дуги, що горить при напрузі 5÷8 В. Для секціонованих газотронів з наповненням інертними газами і робочою напругою 10÷20 кВ потенціал запалення може перевищувати падіння напруги в дузі в 10 і більше разів.

У низьковольтних газотронах розрахованих на робочі напруги до 500В балон заповнюється аргоном і має відносно високий тиск. Відносно менший тиск – у високовольтних газотронах, розрахованих на робочі напруги від 1,5 до декількох сотень кіловольт. Балони таких газотронів наповнені парами ртуті, аргоном, криптоном, ксеноном або їх сумішами. У деяких типах високовольтних газотронів використовується допоміжний електрод (вольфрамовий катод), розташований поблизу анода, для зниження потенціалу запалення.

У ртутних газотронах тиск пари залежить від температури ртутної краплі, що знаходиться в нижній частині балона. Для оберігання ртутної краплі від тепла дугового розряду і розігрітого катода балони ртутних газотронів мають подовжену нижню частину – горловину. Верхня частина балонів має великий кульовий об'єм. Горловина має температуру не вище 50°C і відокремлена від розрядної частини металевим екраном, що оберігає її від температури розряду. Температура кульової частини балона може досягати 150÷180°C. При експлуатації приладу горловина повинна знаходитися завжди нижче кульовій частині балона, оскільки вона виконує функцію конденсатора ртуті.

Робоча температура навколишнього середовища для низьковольтних газотронів лежить в діапазоні від —60 до +70°C. Високовольтні газотрони повинні працювати при температурі від 15 до 35°C. У той же час допустима температура навколишнього середовища під час роботи газотронів з ртутним наповненням лежить в межах від 15 до 50°C, а для газотронів з газовим наповненням – від 60 до 100°C.

Позначення газотронів (наприклад, ГР30-50/20) складається з чотирьох елементів:

Перший елемент – "Г" (газотрон)

Другий елемент – "Г" (з газовим), "Р" (ртутним) або "ГР" (змішаним) наповненням

Третій елемент – номер розробки

Четвертий елемент – дріб, в чисельнику найбільший середній випрямлений струм (у Амперах), в знаменнику найбільша допустима зворотна напруга (у кіловольтах).

Позначення газотронів (наприклад, ВГ100) старих типів складається з двох елементів:

Перший елемент – "ВГ" (випрямний газотрон)

Другий елемент – номер розробки

Стабілітрони

Ст абіліт ронами називають газорозрядні прилади, у яких напруга між електродами на робочій ділянці характеристики трохи зростає при збільшенні розрядного струму. Залежно від виду використовуваного електричного розряду в газі розрізняють *ст абіліт рони т ліючого і коронного розрядів*.

Стабілітрони тліючого розряду. Газорозрядний стабілізатор тліючого розряду (стабілітрон) є скляним балоном циліндрової форми (рис. 1.15), наповненим яким–небудь інертним газом (аргоном, гелієм, неоном) при тиску в декілька десятків міліметрів ртутного стовпа. У балоні поміщені два концентрично розташованих сталевих або нікелевих електроди, виконані у вигляді стакана або циліндра. Часто анод стабілізатора робиться у вигляді дротяного штирка, поміщеного в центрі циліндрового катода.

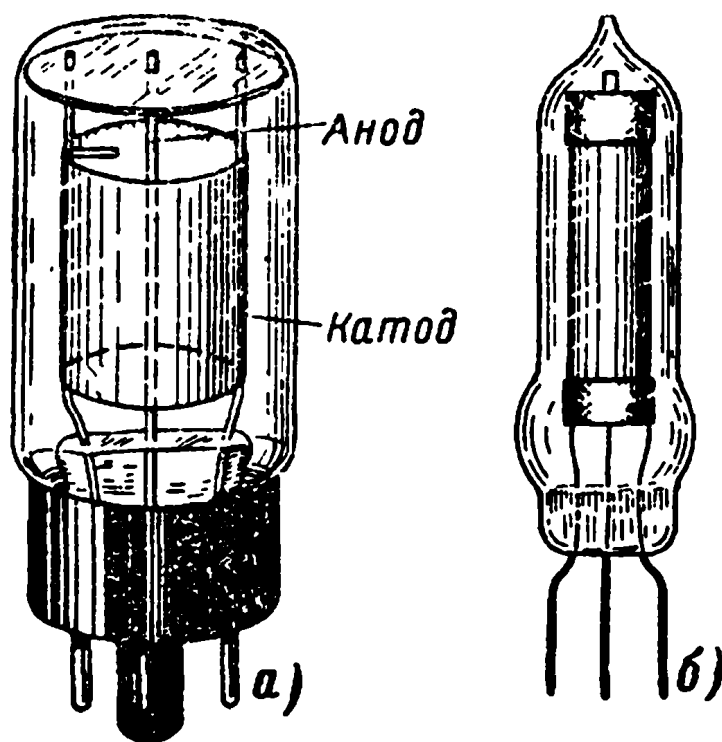


Рисунок 1.15 – Конструкція стабілітрона тліючого (а) і коронного (б) розряду

Катод стабілітрона тліючого розряду, площа якого пропорційна робочому струму, повинен мати більшу, ніж анод, поверхню. Чим більша поверхня катода, тим більший максимальний струм, при якому ще зберігається катодне падіння. Тому катодом в стабілітроні завжди є зовнішній електрод, що має найбільшу площу. Для пониження запальної і робочої напруги стабілітрона поверхня його катода активується, тобто покривається якнайтоншою (достатньо одноатомної) плівкою якого-небудь рідкоземельного металу або сплавом рідкоземельних металів із залізом, так званим мішметаллом. Покриття катода проводиться термічним випаровуванням пігулки рідкоземельного металу з анода, куди вона для цього поміщається. Окрім цього, з метою зниження напруги запалення в деяких стабілітронах тліючого розряду катод забезпечується відростком (гачком), наближеним до анода. Цей відросток катода добре видно в стабілітроні СГ4С, якщо дивитися на нього зверху.

Величина номінальної (робочої) напруги, яка визначається в основному катодним падінням, змінюється залежно від газу, яким наповнюється балон

стабілітрона, і матеріалу, що активує катод. Часто для наповнення застосовують суміш газів: так, балон стабілітрона СГ2С наповнений неоном, а балон стабілітрона СГ3С – сумішшю аргону і гелію. Крім цього, в деяких типах стабілітронів для зміни величини робочої напруги використовується, окрім катодного падіння потенціалу, і анодне падіння. Останнє трохи підвищує робочу напругу до заокругленої величини. Так, наприклад, в стабілітроні СГ4С катодне падіння складає близько 132В, а анодне – близько 18В, що і забезпечує 150В робочої напруги.

Виготовлений стабілітрон заздалегідь формується робочим струмом упродовж 40÷80 годин; в кінці формування робоча і запалююча напруги змінюються на $\pm 10 \div 20\%$. Ця обставина, крім неоднакових розмірів катода і анода, також підкреслює необхідність дотримання полярності при включенні стабілітрона в схему.

Основною характеристикою стабілітрона є його вольт–амперна характеристика, зображена на рис. 1.16. Робочою областю вольт–амперної характеристики стабілітрона є ділянка AB , відповідна нормальному тліючому розряду. В результаті процесів іонізації і рекомбінації у катода спостерігається характерне тліюче свічення, що розширюється при збільшенні струму. Таким чином, ширина області AB пропорційна площі катода.

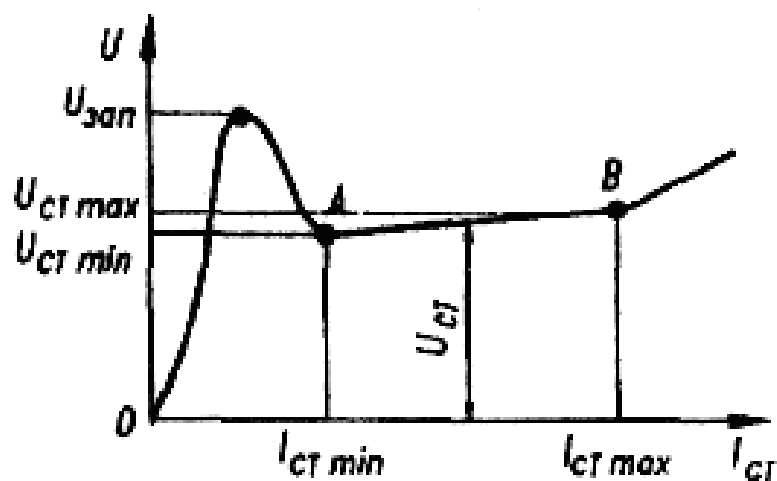


Рисунок 1.16 – Вольт–амперна характеристика стабілітрона

Схема включення стабілітрона показана на рис. 1.17.

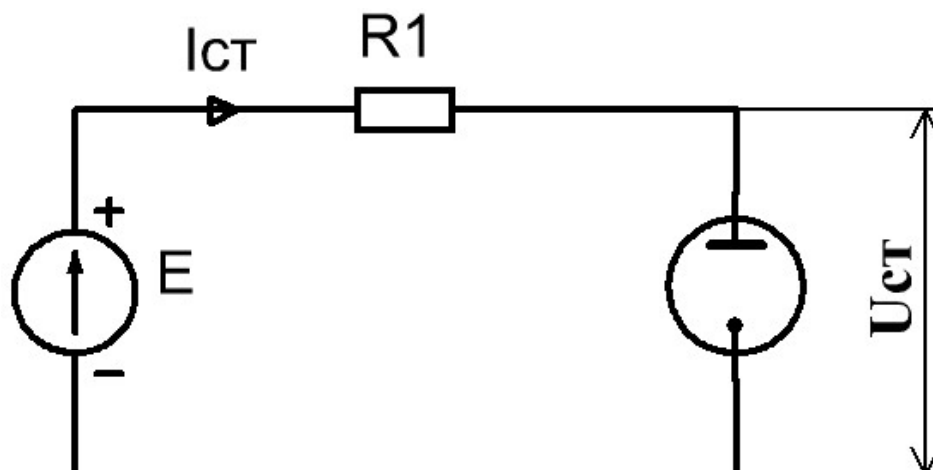


Рисунок 1.17 – Схема включення стабілітрона тліючого розряду

Якщо на анод подано позитивну напругу, більшу, ніж напруга запалення $U_{зан}$, у стабілітроні виникає тліючий розряд. При струмі, більшому I_{CTmin} (крапка *A* на рис. 1.16), у стабілітроні виникає нормальний тліючий розряд і падіння напруги на стабілітроні U_{CT} залишається практично постійним, поки вся поверхня катода не покриється свіченням (крапка *B* на рис.2.16). Значення струму стабілітрона при заданому U_{CT} визначається по формулі

$$I_{CT} = (E - U_{CT})/R1.$$

Резистор R1 так само, як і в приладах дугового розряду, є функціонально необхідним елементом, що обмежує значення струму.

Основними параметрами стабілітрона є:

- напруга запалення $U_{зан}$,
- напруга стабілізації U_{CT} ,
- мінімальний струм стабілізації $I_{CT\ min}$,
- максимальний струм стабілізації $I_{CT\ max}$,
- час запізнювання виникнення розряду $t_{зАП}$,
- диференціальний опір стабілізації на робочій ділянці *AB*.

Напруга запалення $U_{зан}$ – величина напруги між електродами стабілітрона, яка достатня для надійного виникнення електричного розряду в газі проміжку приладу.

Напруга стабілізації U_{CT} – величина стабільної напруги підтримуваної стабілітроном.

Мінімальний струм стабілізації $I_{CT \text{ min}}$ – мінімальна величина сили струму через стабілітрон, при якій зберігаються паспортні дані приладу. Якщо величина струму через стабілітрон знижується нижче за мінімальне значення, розряд в приладі припиняється і стабілітрон гасне.

Максимальний струм стабілізації $I_{CT \text{ max}}$ – максимальна величина сили струму через стабілітрон, при якій напруга, що стабілізується, не перевищує верхньої граничної величини. Максимальне значення величини струму обмежене величиною граничної потужності, яка розсіюється на стабілітроні, і зрушенням його характеристик в область аномального тліючого розряду.

Час запізнювання виникнення розряду $t_{зат}$ – це інтервал часу між моментом додатку напруги до розрядного проміжку катод анода і моментом виникнення розряду.

Стабілізуючі властивості стабілітрона визначаються його диференціальним і статичним опорами. Диференціальний опір $R_{диф}$ у діапазоні робочих струмів визначається за вольт–амперною характеристикою як відношення приросту напруги ΔU_{CT} до зміни робочого струму через стабілітрон (ΔI_{CT}):

$$R_{диф} = \Delta U_{CT} / \Delta I_{CT}$$

Статичний опір $R_{стат}$ у кожній точці робочої ділянки вольт–амперної характеристики визначається за формулою:

$$R_{стат} = U_{CT} / I_{CT}$$

Статичний опір значно більше диференціального. Диференціальний опір стабілітрона тліючого розряду складає від десятків до сотень Ом, а стабілітрона коронного розряду — більш 100 кОм.

Стабілітрони коронного розряду відрізняються від стабілітронів тліючого розряду вищим тиском газу і відсутністю запалювального електроду, тому вони мають вищу напругу стабілізації.

Коефіцієнт стабілізації схеми із стабілітроном

Коефіцієнт стабілізації схеми із стабілітроном визначається не тільки його властивостями, але і параметрами схеми (рис 2.18).

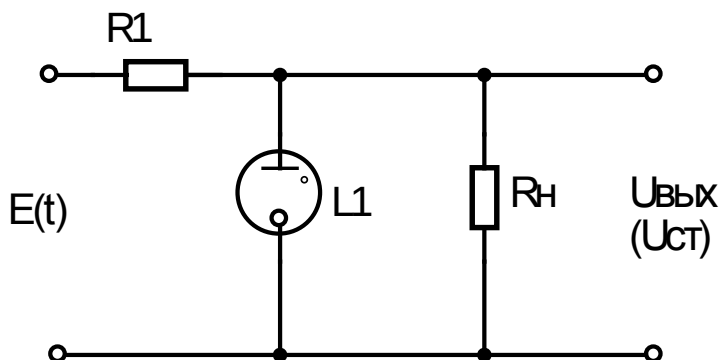


Рисунок 1.18 – Схема включення газорозрядного стабілітрона тліючого розряду

З схеми видно, що додатковий опір $R1$ і внутрішній опір стабілітрона r_{cm} утворюють по відношенню до нестабільної (що змінюється) напруги E дільник (величиною опору шунту R_H можна нехтувати зважаючи на те що $r_{cm} < R_H$). Це дозволяє визначити зміну стабілізованої напруги на навантаженні $\Delta U_H \approx \Delta U_{cm}$ при зміні живлячої напруги ΔE .

Приріст напруги на стабілітроні складатиме частину приросту живлячої напруги, який визначається співвідношенням плечей дільника:

$$\Delta U_{CT} = \Delta E \frac{r_{CT}}{R1 + r_{CT}} \approx \Delta E \frac{r_{CT}}{R1}$$

Формула показує, що зміна напруги на навантаженні в $R1/r_{cm}$ раз менше зміни живлячої напруги.

Для характеристики стабілізуючих властивостей схеми на основі стабілітрона треба знати ще коефіцієнт стабілізації. Він є відношенням зміни живлячої напруги до зміни стабілізованої напруги, тобто

$$K_{CT} = \frac{\Delta E}{\Delta U_{CT}} = \frac{R1 U_{CT}}{r_{CT} U_{ПНТ}}$$

З еквівалентної схеми виходить, що чим більше $R1$, тим більше повинно бути напруга живлення E . Проте велике значення E не вигідно з енергетичної точки зору, оскільки велика частина напруги живлення втрачатиметься в додатковому опорі $R1$.

Для вирішення питання про правильний вибір величини додаткового опору можна скористатися графічною залежністю (рис 2.19), яка зв'язує величини стабілізації і додаткового опору.

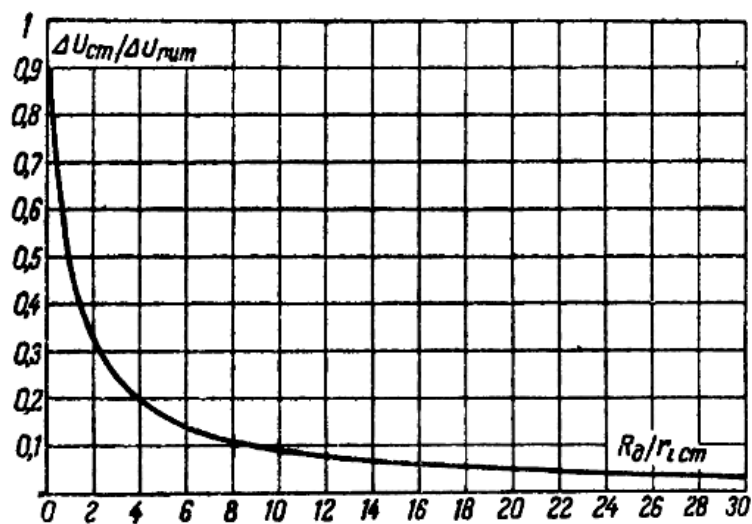


Рисунок 1.19 – Залежність відношення зміни стабілізованої напруги до зміни живлячої напруги від відношення додаткового опору стабілітрона до його внутрішнього опору.

Ця залежність показує, що збільшення відношення R_1/r_{ct} вище за значення 10÷12 не має сенсу, оскільки при подальшому його збільшенні відношення $\Delta U_{CT}/\Delta E$, що визначає коефіцієнт стабілізації, зменшується дуже поволі, і виграш в коефіцієнті стабілізації не окупається підвищенням напруги живлення.

Проте збільшення додаткового опору збільшує межі змін живлячої напруги, в яких забезпечується стабілізація (діапазон стабілізації). З огляду на те, що робота стабілітрона обмежена мінімальним і максимальним струмом через нього, межі змін живлячої напруги, в яких зберігаються стабілізуючі властивості схеми, визначаються як добуток максимальної зміни струму через стабілітрон (діапазон зміни струму) на величину додаткового опору, тобто

$$\Delta E = (I_{CT.MAX} - I_{CT.MIN}) R_1$$

Величина живлячої напруги згідно схеми (рис. 1.18), в якій стабілітрон і додатковий опір сполучені послідовно, повинна бути рівна сумі стабілізованої напруги на навантаженні U_{ct} і падіння напруги на додатковому опорі, що створюється струмом навантаження I_n плюс струмом через стабілітрон I_{ct} , тобто

$$E = U_{CT} + (I_n + I_{CT}) R_1.$$

Можна прийняти за I_{ct} мінімальний струм через стабілітрон, який для більшості стабілітронів тліючого розряду рівний 5ма, а для коронних стабілітронів лежить в межах 3÷10 мка. При цьому треба мати на увазі, що при підвищенні живлячої напруги струм через стабілітрон збільшується, а при зменшенні цієї напруги струм зменшується. Це і дозволяє за рахунок падіння напруги, що змінюється, на додатковому опорі забезпечити постійну напругу на електродах стабілітрона (навантаженні).

Якщо при розрахунку величини живлячої напруги враховується мінімальне значення струму через стабілітрон, то для забезпечення стабілізації потрібно вважати що величина живлячої напруги також мінімальна. Це означає, що, якщо необхідно забезпечити постійність стабілізованої напруги при коливаннях напруги у мережі на $\pm 10\%$, та напруга випрямляча (живлення), розрахована для мінімального струму через стабілітрон, повинна відповідати 0,9 напруги мережі, тобто 90% від номінального значення. Недотримання цього приведе до того, що стабілізація буде односторонньою, при якій тільки зростання живлячої напруги регулюватиметься стабілітроном. Зниження живлячої напруги не зможе компенсуватися стабілітроном тільки тому, що струм через нього вже не може зменшитися без припинення розряду в стабілітроні, оскільки в розрахунку приймалося мінімальне значення цього струму.

Якщо при розрахунку враховувати максимальне значення струму через стабілітрон $I_{ст, макс}$, то при цьому стабілізація відбуватиметься тільки при зниженні живлячої напруги. Підвищення напруги живлення в цьому випадку може привести до виходу стабілітрона з ладу із-за дуже великого струму через нього. Тому для більшості випадків стабілізації правильним буде при розрахунку напруги живлення вважати, що вона змінюється однаково в обидві сторони, і приймати середнє значення струму через стабілітрон.

З вищевикладеного виходить, що значення напруги живлення E і додаткового опору R_1 роблять вплив не тільки на коефіцієнт стабілізації, але і на межі коливань напруги живлення, яка стабілізується. Для того, щоб показати, як від величини відношення R_1/r_{cm} залежать межі коливань напруги живлення, що стабілізуються, вводять поняття коефіцієнта стабілізації:

$$K_{ст} = \frac{\Delta E}{\Delta U_{\Delta U \delta}} = 1 + \frac{R_1}{r_{\delta \delta}} + \frac{R_1}{R_i}.$$

З останньої формули видно, що якість стабілізації збільшується із зростанням додаткового опору R_1 і зменшенням внутрішнього опору стабілітрона.

Індикаторні газорозрядні прилади

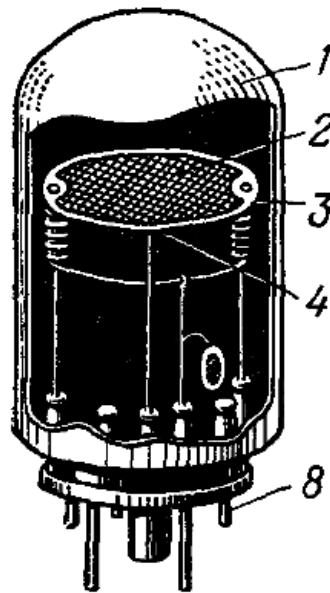
Індикаторними газорозрядними називають прилади, в яких використовується свічення газу при тліючому розряді. Вони застосовуються для сигналізації про наявність напруги або струму в ланцюгах, а також для відображення різної інформації. Широкого поширення у якості індикаторних газорозрядних приладів набули неонові лампи, знакові індикатори і лінійні газорозрядні індикатори.

Неонові лампи

Найбільш простими з індикаторних газорозрядних приладів є неонові лампи. Конструктивно вони оформляються у вигляді скляного балона, заповненого сумішшю інертних газів (неону з домішкою аргону або гелію), в якому розміщуються два електроди: катод і анод. Для того, щоб свічення газу відбувалося із зовнішньої сторони електродів, де воно краще видно, відстань між електродами робиться значно меншою, ніж в стабілітронах. При цьому довжина пробігу електронів між електродами виявляється недостатньою для іонізації газу і тліючий розряд виникає зовні електродів, де шляхи електронів можуть бути довшими, і тому можлива іонізація.

Свічення відбувається навколо катода (негативного електроду), а при живленні змінним струмом – у обох електродів, оскільки вони по черзі стають катодом.

Розміри і форма електродів виконуються залежно від призначення приладу (рис 2.20). Електроди бувають у вигляді букв, дисків, кілець і т.і.



1 — скляний балон; 2 — катод; 3 — анод; 4 — фарфорова підстава з нанесеним шаром люмінофора

Рисунок 1.20 – Конструкція газорозрядного індикатора

Під дією прикладеної напруги, яка подається на електроди лампи, виникає тліючий розряд, що супроводжується характерним свіченням. Для виключення дугового розряду неонові лампи включаються в ланцюг послідовно з обмежувальним резистором, що забезпечує підтримку тліючого розряду. Лампи більшого розміру мають додатковий опір (дротяний або мастичний), який змонтований в цоколі (ніжці). Лампи малого розміру не мають додаткового опору і його потрібно обов'язково включати зовні; величина цього опору визначається залежно від напруги живлення, напруги горіння (робочої) і максимального струму для даного типу лампи.

Тліючий розряд в неоні світиться червоно-оранжевим кольором. Окрім ламп з червоно-оранжевим кольором свічення, розроблені кольорові індикаторні лампи. У цих лампах ультрафіолетове випромінювання тліючого розряду порушує шар люмінофора, нанесений або на спеціальну підкладку, або на внутрішню поверхню балона. В результаті люмінофор світиться певним кольором. Для підвищення яскравості свічення балон у деяких неонових ламп

має у верхній частині (над електродами) потовщення, яке відіграє роль маленької збираючої лінзи.

У полях високої частоти неонові лампи світяться без приєднання їх електродів; в цьому випадку напруга, що забезпечує розряд в газі, створюється електромагнітним полем високої частоти. В процесі роботи неонові лампи знаходяться в режимі аномального катодного падіння, коли вся поверхня катода покрита свіченням. При зміні величини напруги на електродах змінюються величина струму через лампу і яскравість її свічення.

Існує велика різноманітність у формі і взаємному розташуванні електродів у неонових ламп, так само як і у формі їх балонів і загальних розмірах (рис. 1.21). Неонові лампи є як розміром із звичайну освітлювальну лампу, так і в половину лампочки кишенькового ліхтаря.

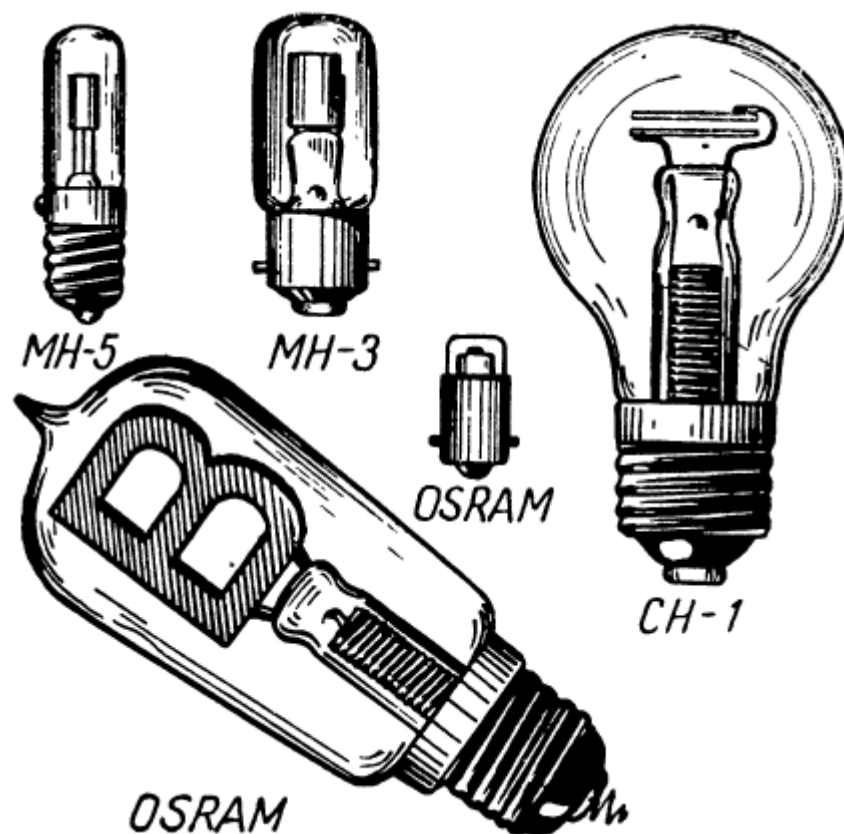


Рисунок 1.21 – Зовнішній вигляд індикаторних газорозрядних приладів

Основними параметрами неонових ламп є: напруга запалення, напруга горіння, сила світла, яскравість і колір свічення, а також анодний струм.

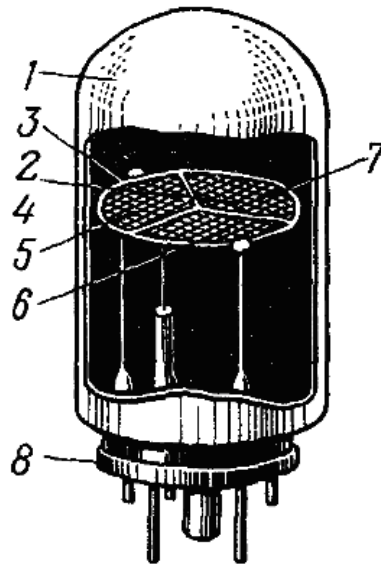
Позначення газорозрядних індикаторних ламп складається з букв і цифр, які позначають вид розряду, найменування газу що заповнює лампу, найбільше значення струму (у міліамперах) і порядковий номер розробки. Наприклад, лампа ТН–20–2 — неонова лампа **тліючого** розряду із струмом споживання до 20 мА.

Прикладами індикаторних ламп можуть служити лампи МН–3, ТН–0,2, ТЛЖ–3–2 (з жовтим кольором свічення).

Одним з недоліків сигнальних ламп (як індикаторів) вважалася наявність тільки одного кольору свічення – оранжево–червоного. Нещодавно розроблені склади люмінофорів дозволили одержати індикатори з кольоровим зображенням. Конструктивно у таких індикаторів між двома електродами є керамічна підстава з нанесеним на ньому шаром люмінофора. Один електрод виконаний у вигляді рідкої сітки. Спостереження ведеться з торця балона лампи. Як приклад такого індикатора можна привести лампу типу ИН–25.

Принцип роботи кольорової сигнальної лампи полягає в наступному: при подачі напруги між анодом і катодом виникає розряд, що генерує ультрафіолетове випромінювання, яке порушує шар люмінофора, нанесений на спеціальну підкладку, і люмінофор починає світитися властивим йому кольором (зеленим, синім, червоним і т. д.). Такі індикатори мають яскраве рівне свічення. Яскравість свічення знаходиться в межах $200 \div 500$ кд/м², що достатнє для різних умов експлуатації.

Кольорові індикатори різко розширили діапазон застосування сигнальних ламп. Кольорові індикатори знайшли широке застосування в найрізноманітніших інформаційних табло, світловому годиннику, в світлових газетах і т.д. З'явилася можливість створення в найближчому майбутньому мозаїчного багатоколірного екрану на різноколірних газорозрядних лампах. Для створення в одному балоні двох – трьох різних кольорів свічення на підкладці робляться сектори (два або три), на які наносяться люмінофори різного кольору. Катод в такому індикаторі може бути загальним, а всі аноди мають окремі висновки для забезпечення самостійного включення (рис 1.22).



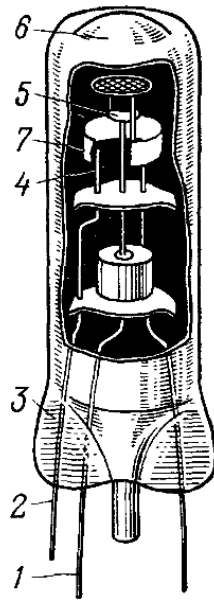
1 — скляний балон; 2 — катод; 3 — анод; 4 — фарфорова підстава з нанесеним шаром люмінофора; 5 — люмінофор зеленого кольору; 6 — люмінофор синього кольору; 7 — люмінофор червоного кольору; 8 — октальний цоколь.

Рисунок 1.22 – Конструкція трибарвного неонових індикатора

Конструктивно ці індикатори можуть мати октальний цоколь, або гнучкі висновки, а свічення люмінофора спостерігається через торець скляного балона.

Серед сигнальних індикаторів тліючого розряду останнім часом з'явилися індикатори з низьковольтним управлінням. Прикладом такого індикатора може служити індикаторна лампа ИН-6, зовнішній вигляд і конструкція якої приведені на рис. 1.23. Прилад є трьохелектродним індикатором з перенесенням розряду.

У його склад входять: два катоди і загальний анод, виконаний у вигляді ковпачка з отвором в центрі. Анод індикатора виконаний з титану, а катоди виконані з молібдену (один у вигляді диска, а другий у вигляді циліндра).



1 — виведення індикаторного катода; 2 — виведення допоміжного катода; 3 — скляний балон; 4 — допоміжний катод; 5 — індикаторний катод; 6 — лінза; 7 — анод.

Рисунок 1.23 – Зовнішній вигляд і конструкція індикатора ИН–6.

Дисковий катод вважається основним, індикаторним, оскільки випромінює світло, видиме через лінзу куполу колби, коли на ньому виникає розряд. Другий катод, циліндровий, вважається допоміжним, оскільки, коли на ньому відбувається розряд, свічення не видно, оскільки воно екранується індикаторним катодом.

Розряд може горіти поперемінно між анодом і одним з катодів.

Перехід розряду з одного катода на інший здійснюється низьковольтним сигналом управління, який подається на індикаторний катод. Допоміжний катод звичайно заземляється. Рівень напруги управляючих сигналів змінюється при перемиканні від мінус 2 до мінус 6 В.

Процес переходу розряду відбувається таким чином. При верхньому рівні негативного управляючого сигналу (-2 В) розряд відбувається на допоміжному катоді, оскільки індикаторний катод набуває в цей час результуючого позитивного потенціалу за рахунок падіння напруги на включеному в його ланцюзі резисторі через розрядний струм, що проходить

через нього. Розрядний струм створюється іонами, які дифундують з плазми розряду до негативного по відношенню до плазми індикаторного катода. При зміні сигналу до -6В розряд переходить від допоміжного катода до індикаторного катода (пряме перенесення).

Після того, як розряд перейшов на катод з нижчим потенціалом, для його утримання досить зберігати різницю потенціалів в декілька десятих доль вольт. Час перенесення розряду, що обчислюється з початку перемикання до переходу розряду в стійкий режим, в індикаторі ИН–6 знаходиться в межах від $0,1\text{мс}$ до $0,3\text{мс}$, зменшуючись із зростанням напруги перемикання.

Після зняття управляючого сигналу індикатор повертається в початковий стан, але не гасне, оскільки розряд переходить на допоміжний катод. Таким чином, прилад ИН–6 може відображати наявність або відсутність електричного сигналу в ланцюгах контролю різних напівпровідникових схем, спрацьовує від малого рівня управляючої напруги. Схема включення індикатора ИН–6 приведена на рис. 1.24.

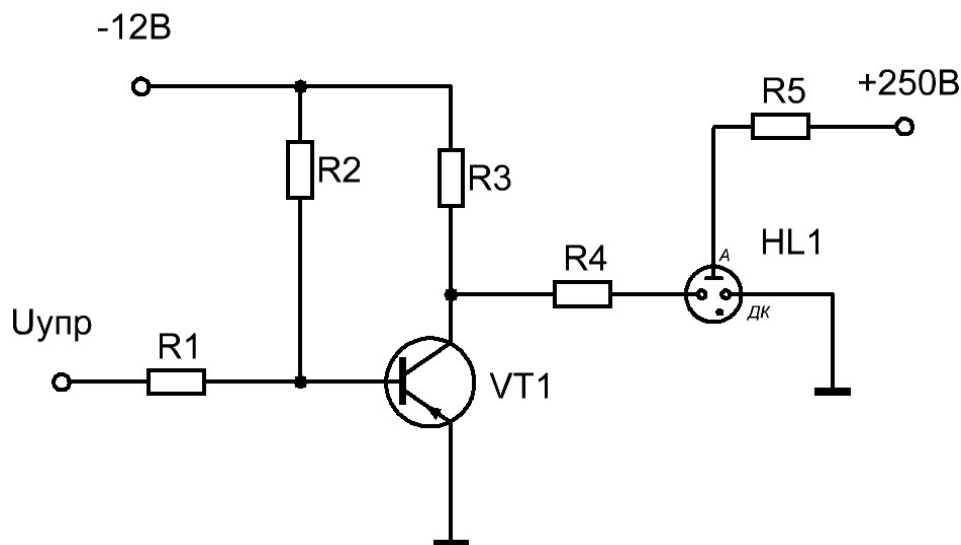


Рисунок 1.24 – Схема включення індикатора ИН–6

Всі неонові індикатори, що випускаються, мають діапазон робочих температур приблизно від -40 до $+70^{\circ}\text{C}$. Такий діапазон виявився явно недостатнім для установки індикаторів в тих пристроях, що працюють в екстремальних умовах, де температура навколишнього середовища може

досягати $150\div 200^{\circ}\text{C}$. У зв'язку з цим вітчизняною промисловістю освоєний випуск індикаторів типу ИН–21, які призначені для роботи в умовах підвищеної робочої температури.

Струм індикації індикатора ИН–21 складає не менше $0,5\text{mA}$, а гранично допустима температура навколишнього середовища до $+200^{\circ}\text{C}$.

Знакові індикатори тліючого розряду дозволяють висвічувати цифри, букви і інші символи. Конструктивно знаковий індикатор складається з балона, наповненого сумішшю інертних газів, і електродної системи (рис. 1.25). Електродна система має один загальний анод 1, виконаний у вигляді рідкої сітки, і декількох індикаторних катодів 2, у формі цифр або знаків.

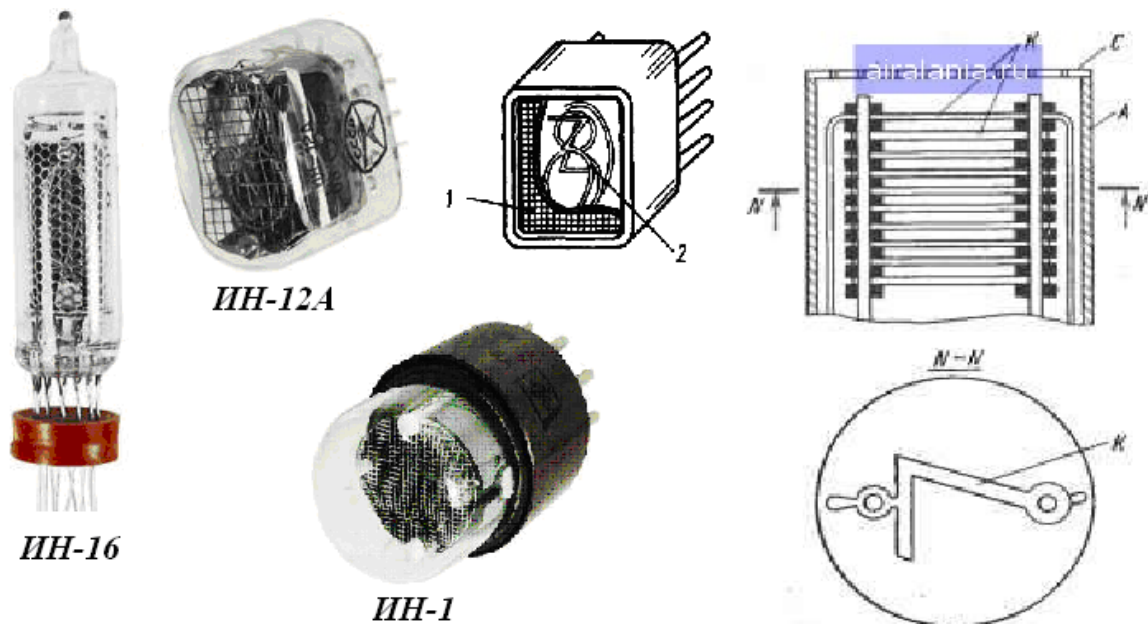


Рисунок 1.25 – Зовнішній вигляд і конструкція знакових індикаторів тліючого розряду

До анода і одного з індикаторних катодів через обмежувальний резистор подається напруга, що перевищує напругу запалення тліючого розряду. Виникаючий при цьому тліючий розряд має форму катода. Комутацією напруги на різні катоди здійснюється зміна зображень цифр або знаків.

Система позначень знакових індикаторів складається з букв "ИН" (індикатор неоновий) і числа, що характеризує порядковий номер розробки (наприклад, ИН–1, ИН–16).

Лінійні газорозрядні індикатори (ЛГІ) дають можливість відображати інформацію про напругу або струм в ланцюзі у вигляді крапок, що світяться, або лінії. ЛГІ діляться на *аналогові* і *дискретні*. У аналогових ЛГІ інформація відображається у вигляді лінії (або ряду крапок), що світиться, довжина якої пропорційна прикладеній напрузі або струму в ланцюзі.

Конструктивно аналоговий ЛГІ є заповнений сумішшю інертних газів скляний балон, усередині якого розташована електродна система, що складається з довгого циліндрового анода, уздовж осі якого розташований катод. Свічення спостерігається через проріз, зроблений по всій довжині анода.

При подачі на ЛГІ напруги між анодом і катодом виникає тліючий розряд. Запалення розряду у початку катода забезпечується зближенням в цій частині анода і катода або використанням спеціального запалювального електроду. Зміна довжини лінії свічення (ділянки катода, охопленого тліючим розрядом) залежно від струму, що проходить, відбувається лінійно. Таким чином, по довжині лінії, що світиться, на нанесеній шкалі можна безпосередньо відлічувати значення напруги або струму. Прикладами аналогових ЛГІ є ИН–9 і ИН–13 (рис 1.26).

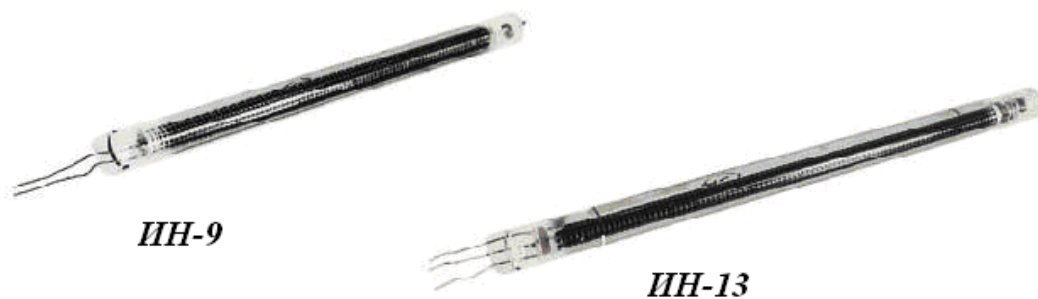


Рисунок 1.26 – Зовнішній вигляд ЛГІ ИН–9 і ИН–13

У дискретних ЛГІ аноди виконані у вигляді групи елементів. Під дією імпульсів, які подаються на схему управління, виникає тліючий розряд між катодом і одним з анодів. Схема управління забезпечує переміщення розряду уздовж лінійки анодів. Зчитування інформації здійснюється по розташуванню крапки, що світиться. Прикладами дискретних ЛГІ є прилади типу ИН–20 і ИН–26.

Газонаповнені розрядники

Газонаповнені розрядники є приладами дугового розряду, які включаються без обмежувальних опорів і не розраховані на тривале проходження струму. Розрядники застосовуються для захисту від високої напруги ліній зв'язку і інших ланцюгів різної апаратури. При напрузі менш ніж напруга запалення розрядника, його опір великий і він не впливає на роботу апарату або пристрою. При підвищенні напруги до напруги запалення в розряднику виникає іонізація (дуговий розряд) і його опір стає дуже малим. В цьому випадку розрядник пропускає весь струм через себе. У радіолокаційних станціях, газонаповнені розрядники застосовуються в пристроях комутації антени з передачі на прийом (у антенних перемикачах), а також для захисту вхідного ланцюга приймача від імпульсів високої напруги.

При роботі антенного перемикача розрядник знаходиться під імпульсною напругою високої частоти. Тривалість імпульсу складає долі і одиниці мікросекунд, форма напруги на розряднику показана на рис. 1.27.

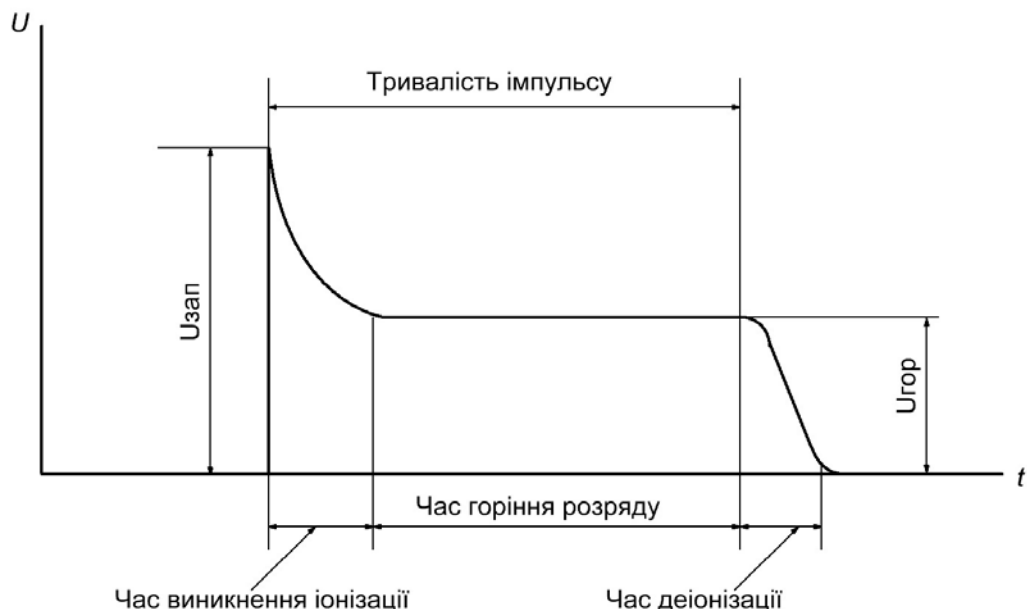


Рисунок 1.27– Форма напруги на розряднику антенного перемикача

На початку імпульсу напруга на розряднику рівна напрузі запалення, а в процесі іонізації воно зменшується до величини напруги горіння. До закінчення

імпульсу передавача амплітуда високочастотної змінної напруги на розряднику залишається незмінною. Із закінченням імпульсу іонізація в розряднику припиняється не миттєво. Протягом деякого часу розрядник ще продовжує пропускати струм (цей струм створюється вже не напругою передавача, а розрядом різних ємностей схеми або сигналом, що приймається), тому вхід приймача ще якийсь час після закінчення імпульсу залишається замкнутим.

Розрядники антенного перемикача повинні задовольняти наступним вимогам:

- опір і напруга між електродами розрядника, що горить, повинні бути мінімальними;
- ємність між електродами повинна бути мінімальною;
- процес виникнення іонізації повинен бути короткочасним (принаймні не більш 10^{-9} с);
- процес рекомбінації повинен бути короткочасним;
- протягом короткого проміжку часу розрядник повинен бути здатний пропускати великий струм.

Простий розрядник (рис. 1.28) є скляним балоном діаметром $1,5 \div 2$ см з двома електродами у вигляді стрижнів, наповнений аргоном. Електроди покриті активним шаром (оксидом).

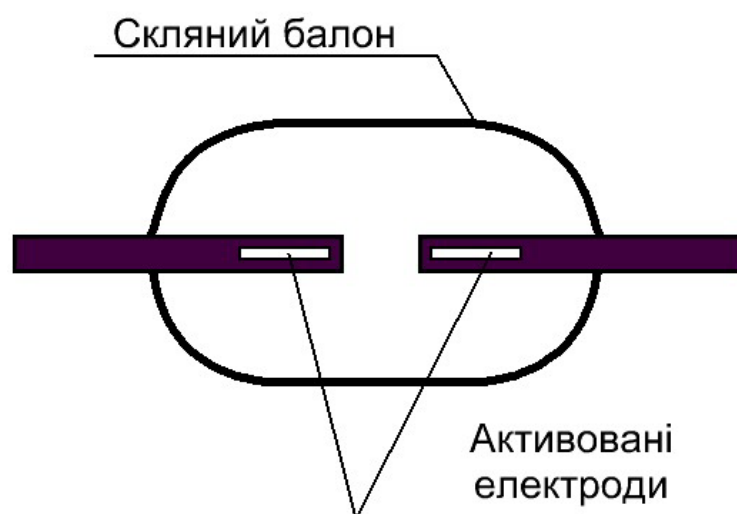


Рисунок 1.28 – Газонаповнений розрядник для роботи в діапазоні метрових хвиль

Напруга запалення такого розрядника рівна декільком сотням вольт, опір розрядника, що горить, рівний $30 \div 60$ Ом. Такі розрядники використовуються в радіолокаційних станціях метрового діапазону хвиль, при тривалості імпульсу не менше $8 \div 10$ μ с.

У радіолокаційних станціях сантиметрового діапазону хвиль, при тривалості імпульсу близько 1 μ с аргонівий розрядник не застосовується із-за наявності між електродами ємності (у декілька пікофарад) і значного часу (в порівнянні з тривалістю імпульсу) виникнення і припинення іонізації. У таких випадках використовується резонансний розрядник з розбірним об'ємним резонатором (рис. 1.29).

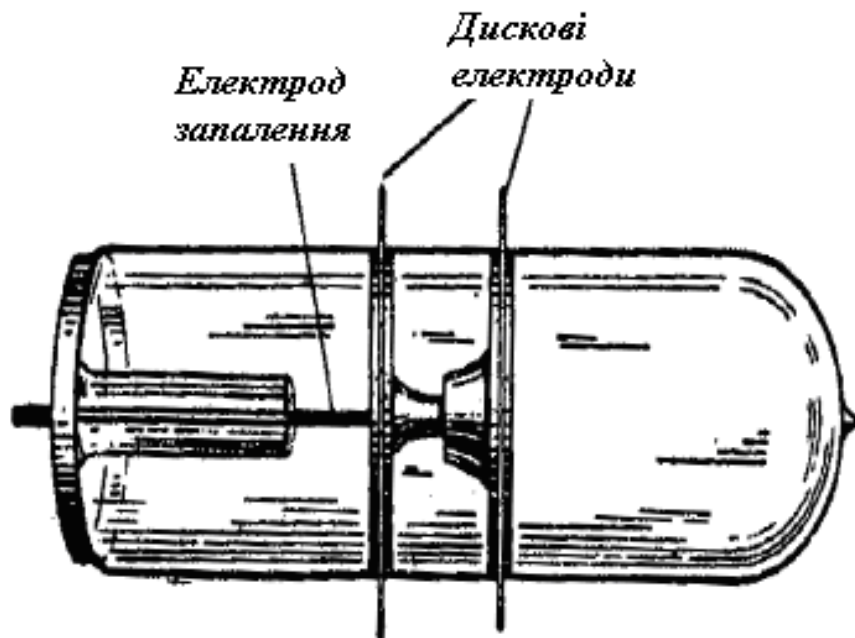


Рисунок 1.29 – Резонансний газонаповнений розрядник з розбірним об'ємним резонатором (деталі об'ємного резонатора на малюнку не показані)

З метою зменшення часу рекомбінації для наповнення розрядника використовують гази, в яких легко утворюються негативні іони. Негативні іони, як і позитивні, малорухливі, тому при припиненні розряду швидко рекомбінують з ними, утворюючи нейтральні атоми газу. Такі властивості мають пари води. Оскільки при низьких температурах пари води конденсуються, то в розрядник, окрім води, вводять деяку кількість водню, який полегшує запалення охолодженого розрядника.

Електроди розрядника мають конусоподібну форму. Така форма забезпечує постійну резонансну частоту об'ємного резонатора.

У розряднику є третій *допоміжний* так званий «запалювальний» електрод. Між запалювальним електродом і об'ємним резонатором прикладена постійна напруга, що підтримує слабкий тліючий розряд. Запалювальний електрод є катодом. Його звичайно активують, щоб понизити напругу джерела, включеного між ним і об'ємним резонатором. Струм в ланцюзі запалювального електроду дорівнює $100\div 150$ мкА. Безперервний тліючий розряд забезпечує постійну наявність іонів і електронів в балоні і зменшує час виникнення іонізації між головними електродами.

В процесі роботи, а також при зберіганні, кисень знаходиться в ємності розрядника і витрачається лише на окислення електродів. Тліючий розряд (під час паузи між імпульсами) прискорює процес окислення, внаслідок чого кількість водяної пари зменшується, а час рекомбінації збільшується. Розрядник з великим часом рекомбінації не придатний для використання в антенних перемикачах. З цієї ж причини непридатним може опинитися розрядник, що зберігався тривалий час ($1,5\div 2$ роки).

1.5.2 Керовані газорозрядні прилади

Виникнення розряду в раніше розглянутих приладах залежить від типу і параметрів газу (тиск), яким заповнено внутрішній простір приладу і конструктивних особливостей (відстань і конфігурація електродів) його конструкції. Для отримання можливості управляти моментом виникнення розряду в газонаповненому приладі в його склад вводять додаткові електроди, які розташовуються між катодом і анодом газорозрядного приладу. До керованих газорозрядних приладів відносяться: тиратрони, таситрони, екзітрони, ігнітрони, артатрони і ін.

Тиратрони

Тиратроном називають газорозрядний прилад, забезпечений додатковими електродами – сітками (від однієї до трьох), які розташовуються між катодом і анодом.

Класифікація тиратронів

Класифікуються тиратрони залежно від конструктивних особливостей, виду газового розряду, режиму роботи, виконуваної функції.

Залежно від виду газового розряду, використовуваного при роботі тиратрона останні діляться на: тиратрони дугового розряду та тиратрони тліючого розряду

Залежно від величин робочих струму і напруги розрізняють тиратрони великої потужності тиратрони малої потужності (малопотужні).

Залежно від конструктивних особливостей (типу катода) тиратрони діляться на: тиратрони з гарячим катодом та тиратрони з холодним катодом.

Залежно від режиму роботи тиратрони можна поділити на: тиратрони статичного режиму роботи та імпульсні тиратрони.

Залежно від виконуваної функції розрізняють випрямні тиратрони, індикаторні тиратрони та логітрони (тиратрони, що виконують логічні функції).

Принцип дії тиратрона

За своєю будовою тиратрон аналогічний газотрону за винятком того, що між катодом і анодом встановлений додатковий електрод (сітка). Умови роботи сітки в газорозрядному приладі істотно відрізняються від роботи сітки в електровакуумному приладі. Роль сітки в тиратроні полягає в тому, що за наявності позитивної напруги на аноді є можливість тримати тиратрон в

замкнутому стані (відсутність розряду в газовому проміжку) за допомогою негативної напруги на сітці.

Поки напруга між сіткою і катодом менше, ніж напруга запалення, ступінь іонізації газу в просторі між катодом і сіткою невелика і в наявності є просторовий заряд негативних електронів (рис 1.30), що емітує катод. У такому режимі роботи тиратрон по суті подібний електронній лампі.

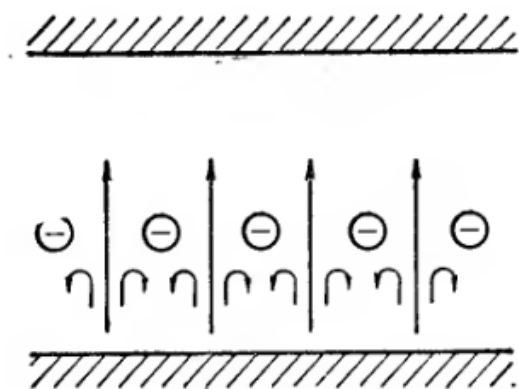


Рисунок 1.30 – Дія сітки на рух електронів в тиратроні при негативній напрузі на сітці тиратрону

При зменшенні величини цієї напруги або при підвищенні анодної напруги частина електронів проходить крізь сітку і потрапляє в сильне поле між сіткою і анодом, яке прискорює електрони. Таким чином, електрони набувають швидкості достатньої для іонізації молекул газу. Вторинні електрони, що з'явилися, разом з первинними електронами летять до аноду, а іони, рухаючись у напрямку до катода, іонізують нейтральні молекули газу, викликаючи тим самим приток нових електронів і лавиноподібне наростання струму. В результаті формується плазма, що виникає спочатку в області анода, а потім поступово заповнює весь простір анод – катод, за винятком катодної області. Оскільки плазма володіє високою провідністю, тиратрон переходить у відкритий (провідний) стан. У момент початку іонізації, коли в тиратроні з'являється низьковольтна дуга, вплив сітки на електронний та іонний потік в приладі істотно змінюється. Позитивні іони, що виникають в процесі іонізації в просторі між сіткою і катодом, притягуються негативно зарядженою сіткою

так, що сітка обволікається захисним шаром позитивних іонів (рис. 1.31), які нейтралізують дію негативного заряду сітці.

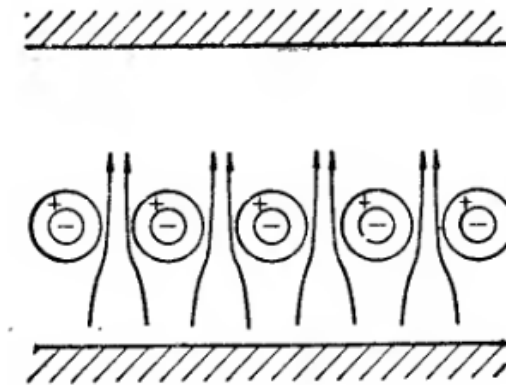


Рисунок 1.31 – Дія сітки на рух електронів у «відкритому» тиратроні при негативній напрузі на сітці

Якщо різниця потенціалів між анодом і катодом достатньо велика, то практично всі електрони, що емітує катод, досягають анода. Іонізація виникає у всьому просторі між анодом і катодом і анодний струм тиратрона стрибком зростає до граничного значення, обумовленого опором анодного ланцюга тиратрона, емісійною здатністю катода, величиною електронного негативного заряду поблизу катода і конфігурацією сітки – тиратрон запалюється. На рис. 1.32 показана залежність анодного струму тиратрона від напруги на управляючій сітці.

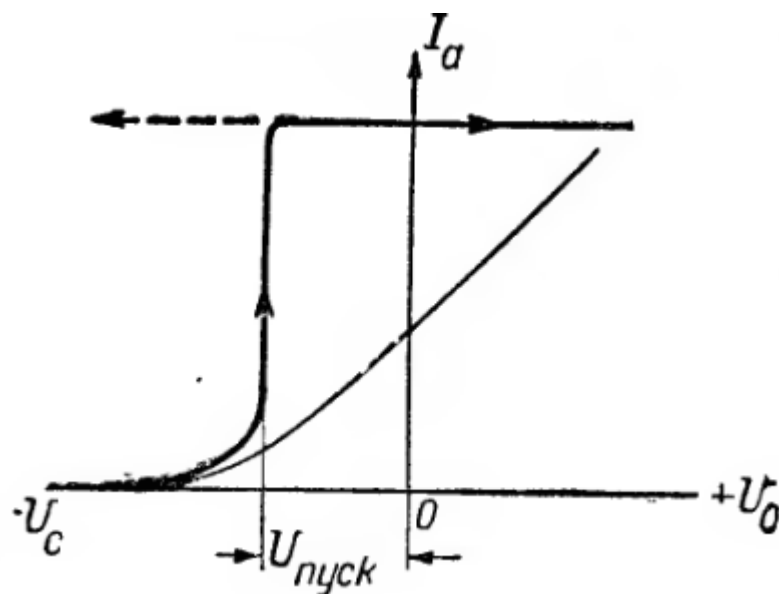


Рисунок 1.32 – Анодно–сіткова характеристика тиратрона

Чим більша негативна напруга сітки, тим при більш високій анодній напрузі відбувається запалення. Це пояснюється тим, що негативна сіткова напруга створює в проміжку сітка – катод гальмуюче поле. Якщо це поле сильніше, ніж поле, що прискорює електрони, проникаюче сюди від анода крізь сітку, то результуюче поле буде гальмуючим і вільні електрони не зможуть пролітати крізь сітку до анода і набирати швидкість достатньої для іонізації газу. Зменшення негативного потенціалу сітки або збільшення анодної напруги призводить до того, що результуюче поле на ділянці сітка – катод стає прискорюючим і виникає (тліючий або дуговий) розряд. Напруга на управляючому електроді, при якому виникає розряд в тиратроні, називається пусковою напругою ($U_{\text{пуск}}$).

При напрузі на сітці, меншій за пускову, початкова частина характеристики схожа з характеристикою електронного діода (показаної на рис. 1.32 кривою без стрілок), хоч вона знаходиться дещо вище завдяки поступовому розвитку іонізації. Після досягнення сіткою пускової напруги струм анода в тиратроні швидко зростає до величини струму низьковольтної дуги. Після того, як газовий розряд в тиратроні розвинувся, напруга на сітці практично не впливає на величину струму, що протікає через прилад. Таким чином, змінюючи напругу на сітці від деякої закриваючої напруги до пускової напруги, можна тільки відкрити тиратрон. Якщо після пуску тиратрона зменшити потенціал сітки, то струм не змінюватиметься, навіть якщо її потенціал стане нижчий за значення ($U_{\text{пуск}}$). Електричне поле сітки при розвинутій плазмі повністю екрановане іонною оболонкою, тому сітковий потенціал ніяк не впливає на протікання струму в тиратроні. Для вільного проходження струму товщина іонної оболонки навколо отвору сітки повинна бути незначна, так щоб центральні ділянки отворів сіток були вільні від дії поля сітки.

Для припинення газового розряду в тиратроні необхідно знизити різницю потенціалів між анодом і катодом до величини, меншої, ніж напруга горіння

низьковольтної дуги. При виключенні тиратрона шляхом зняття напруги з анода поступово відбувається розпад плазми – заряджені частинки плазми з'єднуються одна з одною (рекомбінують) на стінках колби тиратрона або в її об'ємі. У міру зменшення концентрації зарядів товщина сіткових оболонок падає до тих пір, поки не настає момент їх стулення. Цей момент відповідає початку відновлення дії управляючої сітки. При подальшому спаді концентрації заряджених частинок дія електричного поля сітки наростає до тих пір, поки її управляючі властивості не відновляться повністю.

Виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що в порівнянні з газотроном тиратрони повинні мати дві важливі характеристики.

Основні характеристики і параметри тиратронів

Основною характеристикою тиратрона є пускова характеристика. Анодно–сіткова (пускова) характеристика (рис. 1.33) зв'язує між собою анодні (U_a) і сіткові (U_c) напруги, відповідні виникненню розряду.

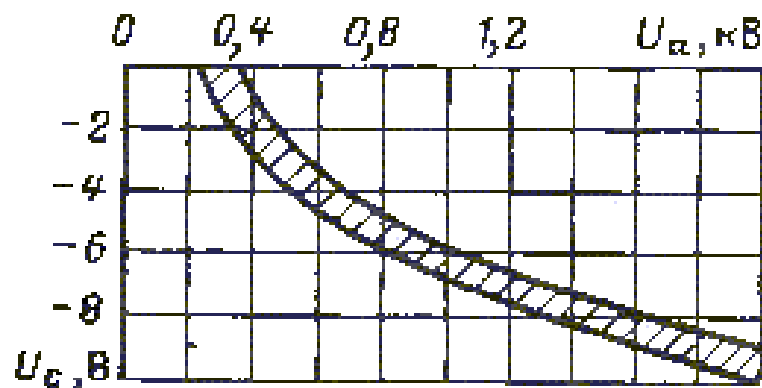


Рисунок 1.33 – Анодно–сіткова (пускова) характеристика тиратрона

Для зняття пускових характеристик тиратрона застосовується електрична схема яка приведена на рис. 1.34.

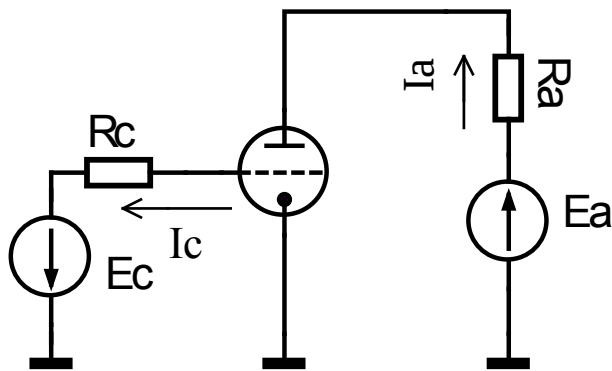


Рисунок 1.34 – Схема електрична принципова для вимірювання параметрів і характеристик тиратрону

При протіканні анодного струму через тиратрон відбувається зсув характеристики вниз – "розбіжка". Це пов'язано з появою падіння напруги на резисторі в ланцюзі сітки (R_C), яке виникає із-за протікання струму в сітковому ланцюзі. При цьому фактичний потенціал сітки виявляється вищим, ніж напруга підключеного до неї джерела.

Більшість тиратронів мають «негативну» пускову характеристику, тобто робоча ділянка характеристики лежить у області негативних значень напруги сітки. Проте застосовуються також тиратрони з «правою» або позитивною пусковою характеристикою, яка повністю або більшої своєю частиною розташовується у області позитивних значень напруги сітки (рис. 1.35).

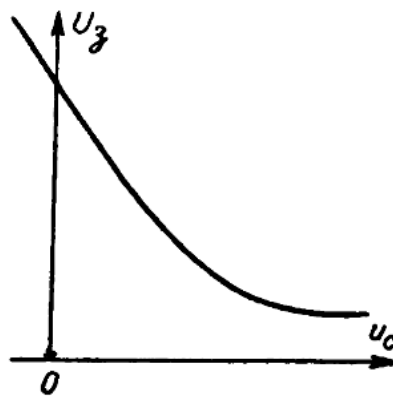


Рисунок 1.35 – Позитивна пускова характеристика тиратрона

У тиратронах з «правою» пусковою характеристикою (відносно початку координат) анод настільки сильно екранований сіткою від катода, що його поле практично не проникає до катода. Тому при негативній напрузі сітки розряд

виникнути не може. Для запалення тиратрона необхідно подати на сітку позитивну напругу.

Положення пускової характеристики може мінятися залежно від температури навколишнього середовища, величини струму і опору резистора в ланцюзі сітки, частоти живлячої напруги і інших чинників. У тиратронах з двома сітками положення пускової характеристики можна також міняти, змінюючи напругу 2-ї сітки. Тому для кожного типу тиратронів існує сімейство характеристик, що визначають пускову область – зону можливих режимів виникнення розряду.

Отже, одній і тій же напрузі на сітці відповідають різні напруги запалення і, навпаки, при одній і тій же анодній напрузі запалення може відбутися при різних напрузі на сітці.

Така нестабільність пояснюється головним чином впливом температури. При включенні тиратрона його температура рівна температурі навколишньому середовищу і тиск газу в ньому менше, ніж температура тиратрона в процесі роботи, внаслідок чого тиск газу в балоні тиратрона збільшується, що призводить до зниження пускової напруги. Тому з підвищенням температури пускова характеристика зрушується вліво (рис. 1.36). Нагрів тиратрона впливає також на величину відстані анод – катод, від якого залежить напруга запалення.

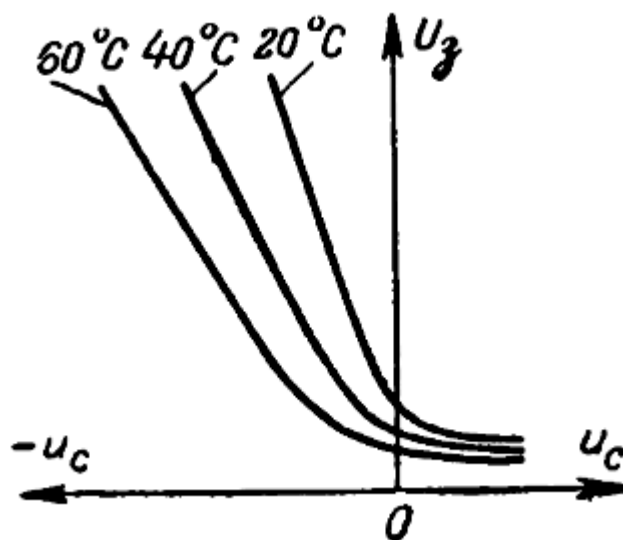


Рисунок 1.36 – Вплив температури на пускову характеристику тиратрона

При роботі в ланцюгах змінного струму в тиратроні спостерігається передрозрядний (або передпусковий) сітковий струм. Він виникає внаслідок того, що під час негативного напівперіоду анодної напруги, коли тиратрон погашений (закритий), деіонізація (рекомбінація) відбувається не миттєво, а поступово і, отже, в просторі між електродами є електрони і іони. Це явище служить причиною виникнення зворотного анодного струму. Разом з тим позитивні іони притягуються до негативно зарядженої сітки, утворюючи в її ланцюзі передрозрядний струм. Цей струм збільшується за рахунок термоелектронної емісії сітки, яка при роботі на змінному струмі нагрівається звичайно сильніше, ніж при постійному струмі. Термоелектронна емісія сітки особливо зростає у випадку, якщо на сітку потрапляє оксид, що розпилюється з катода. Чим більше анодний струм і чим вища частота, тим сильніше передрозрядний струм сітки. Наявність передрозрядного сіткового струму полегшує запалення тиратрона, тобто зрушує його пускову характеристику вліво в область більш негативної сіткової напруги.

Сітковий струм тиратрона, як правило, є даремним, і тому бажано, щоб він був якомога менше. Для його зменшення в ланцюг сітки тиратрона звичайно включають великий по величині (від одиниць до сотень кілоом) обмежувальний резистор R_c . На цьому резисторі струм сітки створює падіння напруги того або іншого знаку (залежно від напрямку струму), і тому напруга на сітці завжди визначається формулою $u_c = E_c - i_c R_c$, у якій електронний сітковий струм слід вважати позитивним, а іонний струм – негативним.

Наявність сіткового обмежувального резистора R_c впливає на пускову характеристику тиратрона. Це пояснюється тим, що передрозрядний сітковий струм, про який згадувалося вище, що є іонним струмом, створює падіння напруги на R_c і декілько зменшує негативну напругу на сітці в порівнянні з напругою джерела E_c . Таким чином, запалення тиратрона відбудеться при нижчій напрузі на його аноді. Якщо пускову характеристику розглядати як залежність анодної напруги запалення не від напруги на сітці U_c , а від напруги

сіткового джерела E_c , то за наявності резистора R_c ця характеристика зрушується вліво, тобто у бік більш негативних сіткових напруг. Зрушення характеристик в ліву сторону буде тим сильніше, чим більше величина R_c (рис. 1.37.).

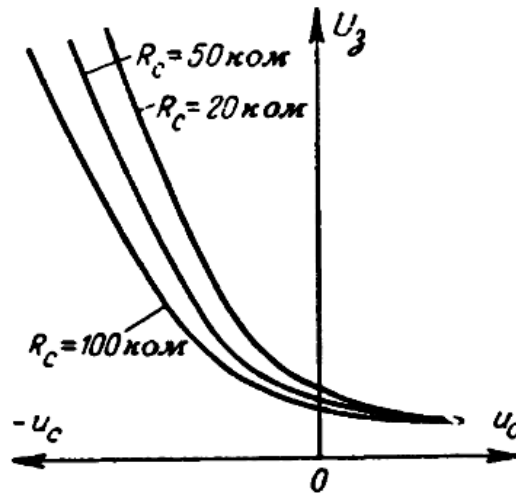


Рисунок 1.37 – Вплив величини резистора R_c на положення пускової характеристики тиратрона

Всі ці чинники і ряд інших другорядних явищ приводять до нестабільності напруги запалення, що є характерним і істотним недоліком взагалі всіх іонних приладів.

Друга характеристика – час відновлення сіткового закриття (рис. 1.38), тобто зміни в часі електричної міцності проміжку катод-анод.

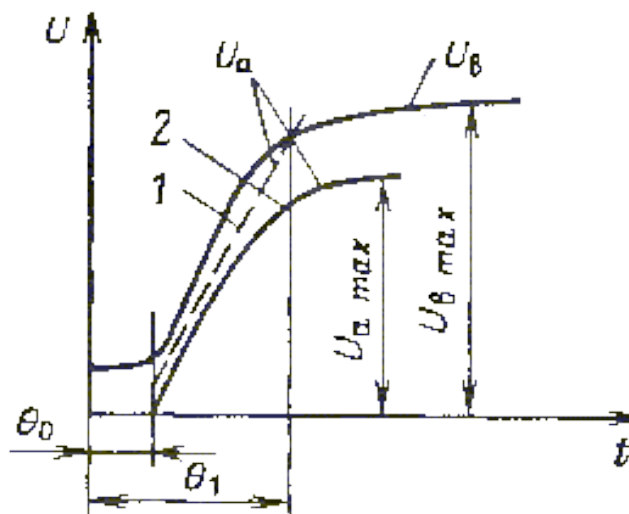


Рисунок 1.38 – Час відновлення сіткового закриття

Вона є залежністю допустимої напруги, яку можна прикласти до анода тиратрона без виникнення основного розряду (відкриття), від часу, що пройшов після припинення струму основного розряду, $U_a=f(t)$. Горизонтальна ділянка кривою тривалістю Θ_0 відповідає інтервалу часу до стулення іонних оболонок навколо сітки. Для того, щоб в цей період в тиратроні не існував основний розряд, до його анода потрібно прикладати напругу, меншу напруги підтримки дугового розряду. Час відновлення сіткового закриття визначає максимальну частоту, на якій може працювати тиратрон.

Для кращого розуміння ролі кривої відновлення сіткового закриття на тому ж графіку показані криві наростання реальної анодної напруги на тиратроні $U_a(t)$. У режимі, відповідному кривій 1, пересічної з кривою відновлення сіткового закриття, тиратрон навіть при негативній напрузі на сітці повторно запалюється у момент часу Θ_1 тобто втрачає керованість по сітці. У режимі, відповідному кривій 2, що характеризується меншою швидкістю наростання анодної напруги, цього не відбувається і режим можна розглядати як нормальний.

Істотним недоліком тиратронів є їх непридатність для роботи на високих частотах, що пояснюється порівняно великим часом деіонізації. Інакше кажучи, іонні прилади мають значну інерційність, унаслідок того, що для рекомбінації носіїв в просторі між електродами тиратрона потрібний певний час.

При деякій підвищеній частоті змінної напруги, що підводиться до анода, відбувається втрата якостей управляючої сітки тиратрона. Для пояснення цього явища припустимо, що на сітці встановлено негативну напругу і при подачі на анод змінної напруги розряд в газовому середовищі тиратрона відбувається в деякий момент, коли анодна напруга досягає певного значення відповідно до пускової характеристики даного тиратрона.

Якщо частота не дуже висока, то за час негативного напівперіоду анодної напруги рекомбінація носіїв в газовому середовищі тиратрона встигне закінчитися. Тому на початку наступного позитивного напівперіоду тиратрон буде замкнутий і його відкриття відбудеться знову тільки тоді, коли анодна

напруга зростає до колишнього значення. Але якщо частоту збільшити, то при деякій частоті до початку наступного позитивного напівперіоду рекомбінація ще не закінчиться і унаслідок наявності в газі електронів і іонів запалення відбудеться при нижчій анодній напрузі. Таким чином, сітка вже не виконуватиме правильно свої функції. Це наочно показують пускові характеристики тиратрона, зняті при різних частотах змінної анодної напруги (рис. 1.39).

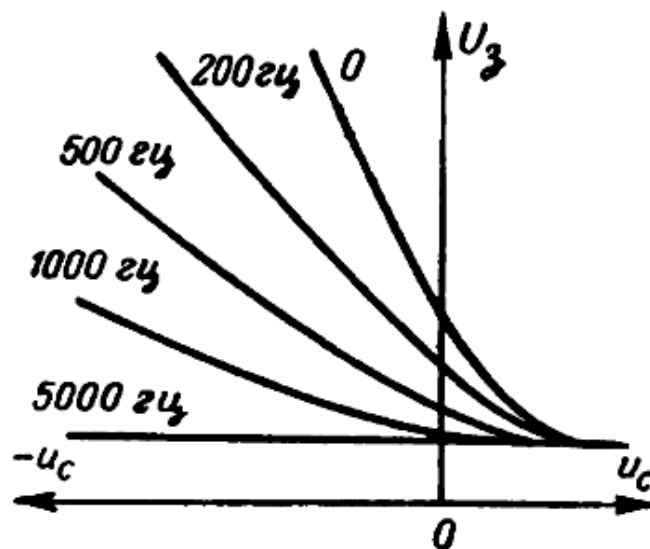


Рисунок 1.39 – Пускові характеристики тиратрона при різних частотах анодної напруги.

З підвищенням частоти напруга запалення зменшується, і характеристика розташовується більш полого, а для деякої частоти, яку можна назвати критичною (f_{kp}), пускова характеристика перетворюється на горизонтальну пряму. Тобто, тиратрон запалюється при мінімальній напрузі запалення незалежно від напруги на сітці. Отже, при цій частоті сітка повністю втрачає управляючу функцію.

Таким чином, чим швидше відбувається рекомбінація, тим на вищих частотах може працювати тиратрон без втрати сіткою управляючої дії. Для визначення можливості застосування тиратронів на тих або інших частотах в довідкових даних тиратрона указується час відновлення управляючої дії сітки.

Даний параметр залежить, перш за все, від роду газу, оскільки у легших газів іони мають меншу масу і більшу рухливість, а отже, швидше рекомбінують. Окрім того, час відновлення зменшується при зменшенні конструктивних розмірів електродної системи тиратрона і струму в ньому, а також при збільшенні анодної напруги.

Як будь-який електронний прилад тиратрони мають ряд електричних параметрів, які нормуються для кожного типу тиратрона.

Зворотна напруга анода тиратрона – максимальна напруга на аноді, при якому в тиратроні не виникає зворотних запалень тиратрона.

Зворотна напруга анода тиратронів залежить від величини струмових навантажень, частоти живлячої напруги, діапазону температур навколишнього середовища, режиму напруження катода, а також з урахуванням швидкості наростання зворотної напруги.

Добуток швидкості наростання зворотної напруги і швидкості спаду струму у момент комутації називається **комутаційним чинником**. Збільшення комутаційного чинника приводить до зростання вірогідності зворотних запалень і скороченню довговічності приладу, тому значення цього коефіцієнта повинно бути обмежено.

Пряма напруга анода – максимальна величина позитивної напруги на аноді тиратрона, при якому зберігається дія управляючої сітки.

Пряма напруга анода в тиратронах встановлюється виходячи з того, щоб сітка зберігала здатність керувати моментом виникнення розряду. Якщо пряма напруга анода перевищить граничне значення, запалення може відбутися при будь-якій напрузі сітки.

Максимальний струм анода тиратрона – величина анодного струму тиратрона при якому його параметри і характеристики зберігаються в перебігу всього терміну експлуатації. Величина максимального анодного струму тиратрона залежить від площі електродів (анода і катода), тиск і типу газового наповнювача.

Максимальна пряма напруга відкритого тиратрона (напруга горіння) – величина напруги між катодом і анодом при максимальному анодному струмі тиратрона. Даний параметр залежить від площі електродів, параметрів газового наповнення (тип газу і тиску) і величини струму через тиратрон.

Критична напруга сітки – значення напруги сітки тиратрона для заданої напруги анода, при якому в основному газовому проміжку починає протікати струм навантаження.

Пусковий струм сітки – амплітудне значення струму, що виникає в ланцюзі сітки під дією управляючої напруги, при якій виникає розряд в основному газовому проміжку.

Час розігрівання катода (і генератора водню) – інтервал часу від моменту включення напруги нагріву катода і генератора водню до моменту, після закінчення якого допускається включення напруги анода.

Час готовності – інтервал часу від моменту включення першої живлячої напруги до моменту, коли параметр, прийнятий за критерій, досягне заданого значення.

Тиратрони з гарячим катодом

Тиратрони з гарячим катодом є, переважно, потужними газорозрядними керованими приладами і, аналогічно газотронам, належать до приладів несамотійного дугового розряду в інертних газах. Тиратрони призначені для випрямлення і перетворення змінного струму промислової частоти 50Гц. Потужний тиратрон з гарячим катодом – це трьохелектродний випрямний прилад, що має анод, катод і управляючу сітку, призначену для управління запаленням.

Конструктивно тиратрони виготовляють або по типу, показаними на рис. 1.40а, та за типами на рис. 1.40б

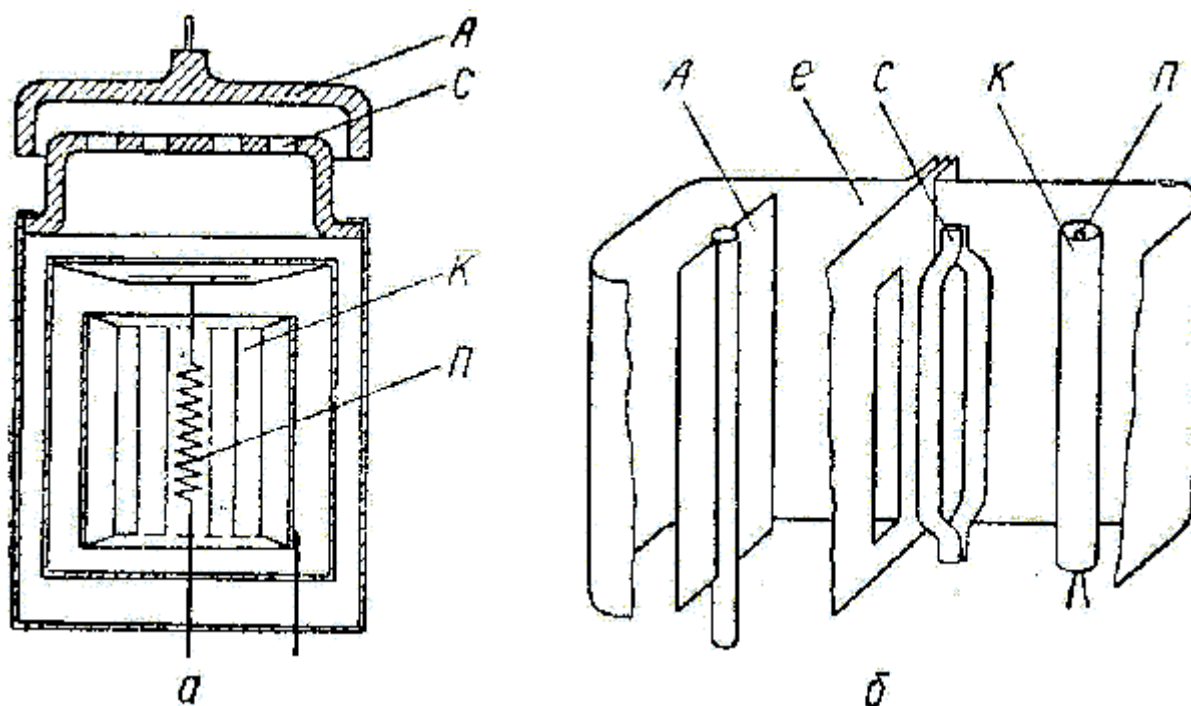


Рисунок 1.40 – Пристрій тиратрона з гарячим катодом

У першому випадку електроди розташовуються один над іншим по вертикалі в різних горизонтальних площинах. Така конструкція типова для тиратронів середньої і великої потужності з виведенням анода на верхню частину балона. При великих розмірах електродів і балона таке розташування конструктивно зручніше і механічно більш жорсткіше.

У другому випадку електроди розташовуються по перетину в одній горизонтальній площині, аналогічно електродам електровакуумних ламп. Така конструкція використовується в малопотужних тиратронах, що наповнюються інертними газами і мають стандартний октальний цоколь.

Катоди потужних тиратронів непрямого нагріву виконуються з оксидним покриттям. Аноди виконуються з нікелю або графіту.

Сітки тиратронів виконуються найчастіше у вигляді нікелевих, молибденових або графітових дисків з отворами різної форми і величини (рис. 1.41).

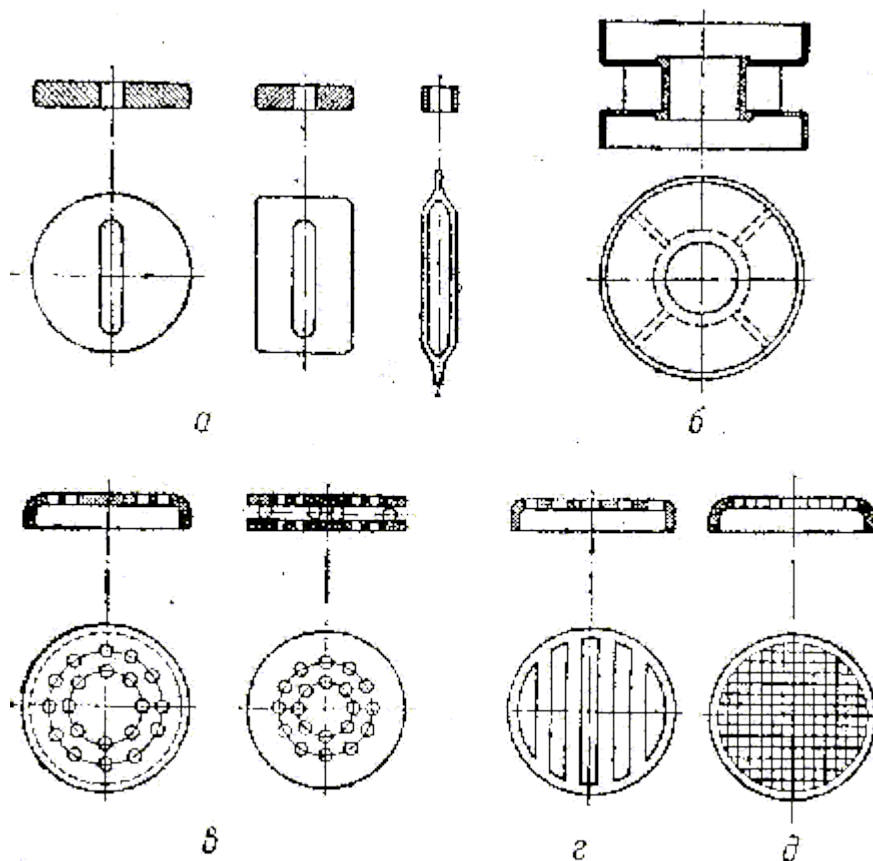


Рисунок 1.41 – Конструкції сіток тиратронів

Найбільш вигідне використання однощільної сітки (рис 2.41а) виходить при виконанні електродної системи аналогічно електровакуумним приладам, в горизонтальній площині. У тиратронах малої і середньої потужності (сила анодного струму до $3\div 5\text{A}$) застосовується одностороння сітка (**рис. 1.41б**), яка має порівняно малу приймальну поверхню, що обумовлює і малі сіткові струми. Перевагою такої конструкції сітки є те, що вона частково захищена від попадання продуктів випаровування катода. Проте через односторонню сітку не можна пропустити значні струми із-за можливого розриву дуги, значних втрат в сітці і локалізації потужного розряду на відносно невеликій ділянці поверхні анода. Тому в потужних тиратронах застосовується багатороння сітка (**рис. 1.41в**).

Велике число порівняно невеликих отворів на великій площі дозволяє зберегти високі управляючі властивості такої сітки і одночасно запобігти значному підвищенню напруги або розриву дуги із зростанням струму. В

деяких випадках для отримання малої проникності сіток доцільно застосовувати подвійну багатодірчасту сітку, що зменшує запилення оксидом відповідальні ділянки сітки і збільшує пробивну напругу.

До недоліків багатодірчастих сіток слід віднести велику приймальну поверхню, що обумовлює великі сіткові струми і підвищує вірогідність забруднення сітки продуктами випаровування катода.

Із зростанням потужності приладу збільшується число отворів, а отже, і площа сітки. Тому в потужних високовольтних і імпульсних приладах, розрахованих на струми в сотні ампер, застосовуються багатощілинні або ґратчасті сітки (рис. 1.41г, д). Багатощілинну сітку одержують з багатодірчастої, сполучаючи ряд отворів щілиною. Це зменшує щільність струму, що доводиться на отвір, і збільшує допустимий струм на прилад при тій же загальній поверхні сітки.

Із збільшенням робочих струмів і напруги тиратрона зростають вимоги до очищення сітки від сторонніх газів, чистоті її поверхні і зменшенню поверхонь поглинання робочого газу. В цьому випадку разом з багатощілинною застосовується ґратчаста сітка з малою масою. Останнє полегшує очищення сітки від сторонніх газів.

У тиратронах при достатньо великій анодній напрузі може виникнути самостійний тліючий розряд між сіткою і анодом. Щоб усунути це шкідливе явище і підвищити граничну напругу, в тиратрон вводиться ще одна – екрануюча сітка. Вона дозволяє також розширити частотний діапазон. Двосіткові тиратрони працюють на частотах до 500 гц. Крім того, екрануюча сітка дозволяє змінювати величину пускової напруги і тим самим зрушувати пускову характеристику тиратрона.

Зменшення часу відновлення може бути досягнуте за рахунок зменшення відстані між електродами і розвитком їх поверхні. Цей шлях привів до створення екранованих тиратронів. У них весь газорозрядний об'єм, включаючи анод і катод, обмежений металевим екраном (рис. 1.42).

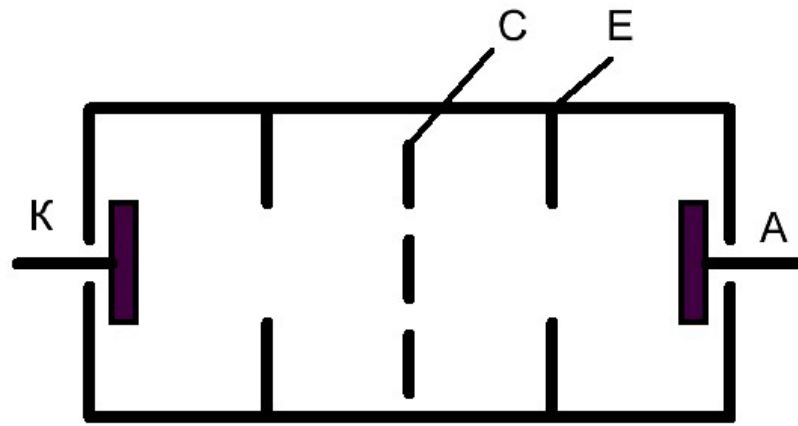


Рисунок 1.42 – Електродна система двосіткового тиратрона

Екран у сіткового електроду має дві діафрагми, що розділяють міжелектродний простір на три секції: катодну, сіткову і анодну. Екран з діафрагмами є екрануючою сіткою тиратрона, на яку відносно катода може подаватися той або інший потенціал. Залежно від потенціалу екрануючої сітки пускові характеристики тиратрона можуть зміщуватися з області негативної напруги U_c в область позитивних значень U_c . Це значно розширює можливості тиратрона як керованого приладу.

Екрануюча сітка своїми діафрагмами здійснює електростатичне екранування управляючої сітки від поля катода і анода і обмежує об'єм деіонізації, в основному, сітковою секцією. Така конструкція сіткового вузла дозволяє зменшити габарити управляючої сітки, понизити її передрозрядний струм до сотих і тисячних доль мікроампера, підвищити робочі напруги тиратрона і розширити його частотний діапазон.

У режимі випрямлення, управління величиною анодного струму тиратрона здійснюється зміною напруги на управляючій сітці, або зміною фази між сітковою і анодною напругою, чим досягається регулювання тривалості проходження струму тиратрона протягом позитивного напівперіоду анодної напруги. Існують три методи управліннь анодним струмом тиратрона: амплітудний, фазовий і імпульсний.

При амплітудному методі управлінні до сітки тиратрона підводиться змінна напруга, співпадаюча по фазі з анодною. Залежно від величини сіткової

напруги змінюється запалення тиратрона, а отже, і величина середнього значення анодного струму. Недоліком цього методу є неможливість плавно регулювати величину анодного струму в широких межах.

При фазовому методі управління можна змінювати зрушення фаз між змінною сітковою і змінною анодною напругою, що змінює момент запалення протягом позитивного напівперіоду, а також змінює середнє значення випрямленого струму.

При імпульсному методі управління на сітку тиратрона подається короткочасний імпульс напруги величиною, достатньою для запалення. Короткочасність імпульсу на сітці дозволяє тиратрону спрацювати точно в певний момент (фазу) напівперіоду. Момент подачі імпульсу можна змінювати в межах всього напівперіоду, чим регулюється середнє значення випрямленого струму. Найбільш стабільним і надійним є імпульсний метод управління.

Позначення потужних тиратронів складається з трьох елементів:

Перший елемент – літери: ТР – тиратрон з ртутним наповненням, ТГ – тиратрон з газовим наповненням, ТГР – тиратрон із змішаним наповненням, ТГІ – тиратрон з газовим наповненням імпульсний.

Другий елемент – номер, привласнений даному типу тиратрона.

Третій елемент – дробове число, в якому чисельник позначає найбільше середнє значення випрямленого струму (для імпульсних – найбільший струм в імпульсі), а знаменник – найбільша допустима зворотна напруга, кВ.

Позначення малопотужних тиратронів складається з чотирьох елементів:

Перший елемент – літери ТГ – тиратрон з гарячим катодом (ТГІ – імпульсний)..

Другий елемент – номер розробки.

Третій елемент – літера в кінці позначення, що визначає конструкцію балона: Б – надмініатюрне скляне оформлення з діаметром балона до 10 мм.

Четвертий елемент (необов'язковий) – індекс, що вказує на приналежність до тієї або іншої категорії ламп підвищеної надійності. Він аналогічний такому ж індексу як у приймально-підсилювальних ламп.

Імпульсні тиратрони з гарячим катодом

Окрему групу тиратронів складають імпульсні тиратрони. Вони застосовуються в радіолокаційних пристроях і призначені для отримання короткочасних електричних імпульсів великої потужності в ланцюгах модуляторів, генераторів розгортки, датчиків імпульсів, формуючих пристроїв і інших схемах. Робота в цих пристроях характеризується значним імпульсним навантаженням при малих значеннях середніх струмів анода. У імпульсному режимі струм анода може досягати значень сотень ампер, тоді як середній струм анода не перевищує одного ампера. При цьому тривалість імпульсів коливається в межах $0,15 \div 30 \mu\text{с}$ при частоті повторення імпульсів від десятків герц до декількох тисяч герц.

При імпульсній роботі необхідний мінімальний час виникнення розряду тиратрона і мінімальний час відновлення його електричної міцності, тобто відновлення дії управляючої сітки тиратрона.

Для забезпечення необхідних режимів роботи імпульсного тиратрона використовують різні конструкції його електродних систем (рис. 1.43).

Катод непрямого нагріву 1 зроблений у вигляді циліндра з ребрами. Бічна поверхня його і ребра покриті оксидним шаром. Таким чином, робоча поверхня катода досить велика, що необхідне для отримання великої імпульсної емісії. Усередині катода розташований нагрівач 2. Для зменшення теплових втрат катод оточений сполученими з ним електрично тепловими екранами 3. Один з них у вигляді диска розташований над катодом і служить також для захисту сітки від попадання на неї оксиду, що розпилюється з катода.

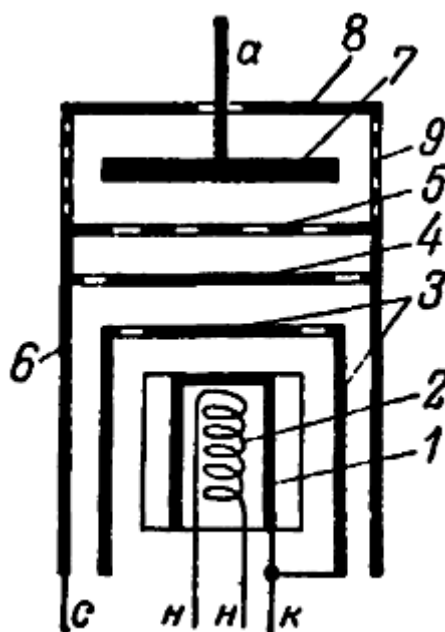


Рисунок 1.43 – Конструкція електродної системи імпульсного тиратрона

Сітка імпульсного тиратрона має досить складну конструкцію. Головними її частинами є запалювальний електрод **4** у вигляді диска з діаметром, трохи більшим, ніж у верхнього теплового екрану і управляючого електроду **5**, в якому зроблений ряд отворів. Обидва ці електроди електрично сполучені з корпусом сітки **6** у вигляді циліндра, що охоплює всю систему електродів. Анод **7**, який має форму диска, оточений екранами **8** і **9**, сполученими також з корпусом сітки. Верхній екран **8** є суцільним диском, а екран **9** для поліпшення охолодження зроблений у вигляді циліндра з дротяної сітки. Таким чином, сітка тиратрона має малу проникність, в зв'язку з чим поле анода практично не діє біля катодної області. Тому без подачі негативної напруги зсуву при нульовому потенціалі сітки тиратрони витримують високі напруги між анодом і катодом. Великі значення анодних струмів обумовлюють застосування багатодірчастого або багатогратчастого типа сітки. При цьому останній тип сітки характерний для приладів великої потужності, тоді як багатодірчасті сітки застосовуються, в основному, в тиратронах малої і середньої потужності. Переваги багатогратчастих сіток полягають в меншій масі сітки, менших пускових струмах, і отже, у меншому нагріві сітки в розряді і, нарешті, в більш рівномірному завантаженні анода.

Такі сітки є нікелевим або молібденовим полотном, привареним до нікелевого кільця сітки (рис. 1.44). При цьому повинні бути прийняті заходи до того, щоб полотно не прогиналося, а зварка кожної нитки полотна була надійною. Інакше при малих відстанях можливі короткі замикання між сіткою і анодом. У тиратронах великої потужності з великим діаметром сіткового кільця допускається зміцнення полотна нікелевими куточками, що приварюються навхрест.

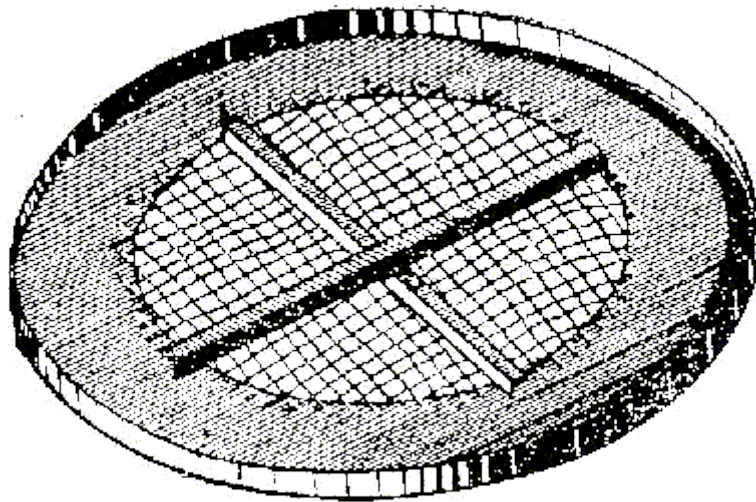


Рисунок 1.44 – Конструкція сітки потужного імпульсного тиратрона

При такому екрануванні анода його електричне поле практично не проникає до катода, тому тиратрон має різко виражену «праву» пускову характеристику, тобто розташовану у області значної позитивної напруги на сітці. Виникнення дугового розряду в такому тиратроні відбувається при подачі на сітку імпульсу позитивної запалювальної напруги (близько декількох сотень вольт), під впливом якої виникає розряд між катодом і запалювальним електродом. Якщо при цьому струм сітки досягне певної величини (так званого пускового сіткового струму $I_{c \text{ пуск}}$), то в проміжку між управляючими запалювальними електродами утворюється достатня концентрація електронів і розряд розповсюджується крізь управляючий електрод на проміжок анод – сітка.

Саме у цей момент відбувається запалення тиратрона, тобто виникає потужний дуговий розряд між анодом і катодом. При цьому анодний струм різко зростає, а анодна напруга різко знижується. Після закінчення імпульсу анодного струму тиратрон гасне. Звичайно для надійнішого закриття тиратрона в проміжку між імпульсами на його сітку подають деяку негативну напругу. Оскільки для імпульсного тиратрона запалення залежить від величини пускового сіткового струму, то як пускову характеристику зручніше розглядати залежність анодної напруги запалення від цього струму (рис. 1.45). Чим більше струм $I_{с\text{ пуск}}$, тим менша анодна напруга потрібна для запалення.

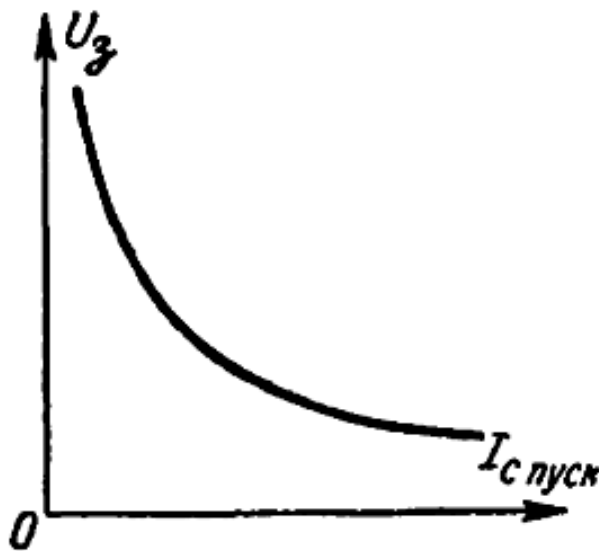


Рисунок 1.45 – Пускова характеристика імпульсного тиратрона

Розглянута вище конструкція імпульсного тиратрона має той недолік, що електроди управляючої сітки, і запалювальний електрод, і тепловий екран, розташований над катодом, значно нагріваються і створюють термоелектронну емісію, яка може порушити нормальну роботу тиратрона. Тому в імпульсних тиратронах для більш високої напруги і великих струмів застосовують іншу конструкцію електродів, зображену схематично на рис. 1.46.

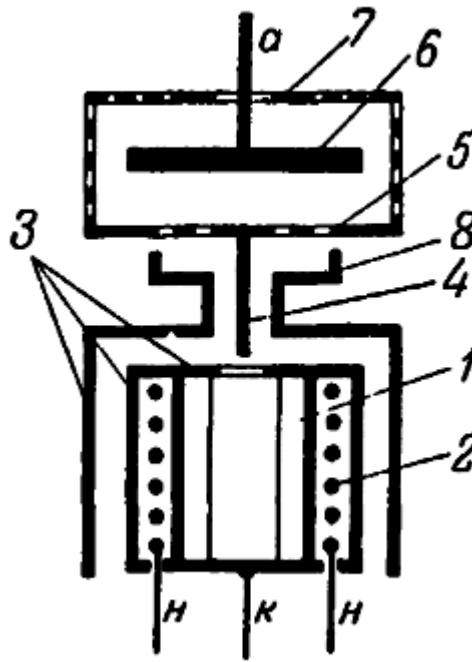


Рисунок 1.46 – Конструкція електродної системи імпульсного тиратрона ТГІ1–130/10

У ній циліндровий катод 1 має нагрівач 2, розташований на зовнішній поверхні, а внутрішня поверхня забезпечена ребрами і покрита оксидом. Катод оточений тепловими екранами 3, причому у верхньому екрані є отвір для проходження розряду. Запалювальним електродом 4 є вольфрамовий провідник (так званий ліфтрон), що йде від центру отвору теплового екрану катода до електроду управляючої сітки 5. Анод 6, як і в попередній конструкції, оточений екраном 7, виконаним частково у вигляді сітки. Між електродом управляючої сітки і катодною частиною також є екран 8, який охоплює запалювальний електрод. Подібна конструкція електродів здійснена, наприклад, в тиратроні ТГІ1–130/10 і ряду інших. Для неї характерні відсутність термоелектронної емісії електродів сітки при роботі у напруженому режимі, можливість отримання коротких імпульсів при високій частоті їх повторення, висока стабільність запалення і ряд інших переваг.

Одним з критеріїв при імпульсній роботі тиратрона є мінімальний час виникнення розряду тиратрона, у зв'язку з цим балони імпульсних тиратронів наповнені воднем, для якого характерна висока рухливість іонів, у зв'язку з чим

забезпечена висока швидкість деіонізації (часу відновлення властивостей управляючої сітки). Деякі імпульсні тиратрони, як виняток, наповнюються інертними газами.

Водневі тиратрони забезпечують отримання коротких імпульсів анодного струму тривалістю від $0,1\mu\text{с}$ і вище з частотою повторення до десятків кілогерц. При цьому напруга анодного джерела, а отже, і анодна напруга на закритому тиратроні можуть досягати десятків кіловольт. Анодний струм в імпульсі доходить до декількох тисяч ампер. Водень для наповнення тиратронів має ще ту перевагу, що при ньому можна допустити порівняно велике падіння напруги на тиратроні під час проходження імпульсу струму (до сотень вольт) без руйнування катода від бомбардування іонами, що пояснюється їх порівняно невеликою масою.

Для роботи на більш низькій частоті і напрузі іноді застосовуються імпульсні тиратрони з наповненням інертними газами, але вони значно поступаються водневим тиратронам своїми експлуатаційними характеристиками. Інертні гази сильно поглинаються продуктами розпаду оксидного катода і це приводить до різкого пониження терміну служби тиратрона, особливо на високих частотах. Швидкість деіонізації цих газів приблизно в 10 разів менша, ніж у водню. Падіння напруги на тиратронах з інертними газами не повинне перевищувати 30В щоб уникнути руйнування катода іонним бомбардуванням. Тому в таких тиратронах не можна допускати великі імпульси струму. В результаті всього цього тиратрони з інертними газами можна застосовувати тільки при напрузі не більше одиниць кіловольт і частотах не більше декількох кілогерц.

Перші зразки водневих тиратронів мали малу довговічність, оскільки в них відбувалося інтенсивне поглинання водню. У сучасних тиратронах є так званий генератор водню у вигляді металевої ампули з порошком гідриду титану, який володіє властивістю виділяти водень при нагріванні. Необхідний нагрів генератора водню до температури $350\div 400^{\circ}\text{C}$ проводиться спеціальним нагрівачем у вигляді алунованого вольфрамового дроту, на який подається

напруга від ланцюга нагріву катода. Генератор водню підтримує певний нормальний тиск водню в балоні (порядку $0,2 \div 1,5 \text{ мм рт. ст.}$). Після виключення підігрівача водень поглинається гідридом титану і в балоні зберігається високий вакуум. Нагрівач водневого тиратрона необхідно включати за $3 \div 5 \text{ хв}$ до подачі анодної напруги, щоб тиск водню в балоні досяг необхідної величини. Напруга нагрівача в процесі експлуатації не повинна змінюватися більше, ніж на 5%, щоб уникнути порушення правильного режиму роботи із-за відхилення тиску газу від нормального значення, оскільки час виникнення пробою в імпульсному тиратроні залежить від тиску газу (рис. 1.47).

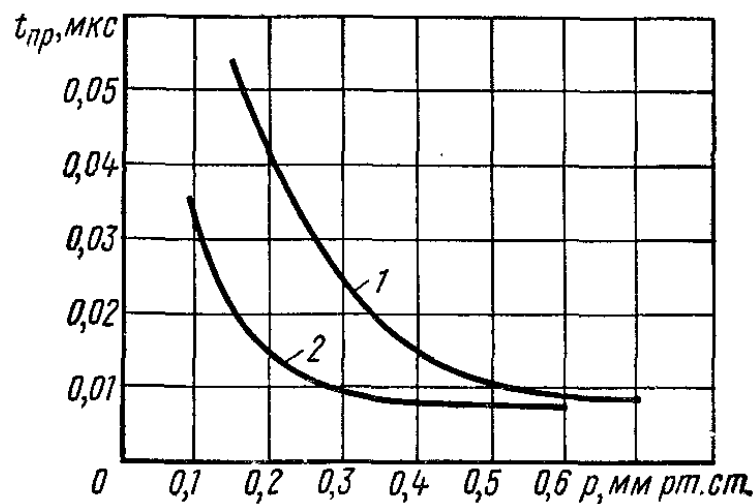


Рисунок 1.47 – Залежність часу пробою $t_{пр}$ від тиску водню p

Крім звичайних параметрів, що характеризують тиратрони, імпульсні тиратрони мають наступні спеціальні параметри:

Імпульсна потужність, тобто потужність імпульсу в навантаженні. У різних типів тиратронів вона має значення від одиниць кіловат до одиниць і навіть десятків мегават.

Частота повторення імпульсів F при певних значеннях анодної напруги U_a і струму імпульсу I_a . Добуток цих трьох величин для даного тиратрона є постійним і називається максимальним коефіцієнтом потужності:

$$FU_a J_a = \text{const}$$

Тому при підвищенні частоти повторення імпульсів необхідно відповідно знижувати анодну напругу або струм імпульсу, або і те і інше.

Тривалість і форма імпульсів анодного струму. Звичайно тиратрони конструюються з розрахунком на отримання імпульсів прямокутної форми з тривалістю $0,1 \div 20 \mu\text{с}$.

Час пробою, тобто час формування дугового розряду в тиратроні, як правило, складає соті долі мікросекунди.

Стабільність запалення характеризується постійністю часу запалення, тобто проміжку часу від моменту подачі імпульсу на управляючу сітку до моменту появи імпульсу анодного струму. Звичайно нестабільність часу запалення не перевищує сотих доль мікросекунди.

Особливості експлуатації імпульсних водневих тиратронів

Ланцюги нагріву тиратронів потребують жорсткої стабілізації напруги напруження. У зв'язку з цим необхідно передбачати обмеження кидка струму в ланцюзі нагрівача при включенні. У тих випадках, коли є окреме виведення нагрівача генератора водню, слід стабілізувати його напругу в межах $\pm 2 \%$.

Рекомендується, щоб амплітуда прямої напруги анода була на рівні $85 \div 90\%$ гранично-допустимої експлуатаційної величини для підвищення надійності роботи тиратрона. В той же час зниження амплітуди більш ніж на 70% неприпустимо, оскільки приводить до збільшення часу запізнювання струму анода і зростанню періодичної нестабільності. Для підвищення надійності роботи тиратрона бажано також знижувати амплітуду імпульсу струму анода. Мінімальне значення амплітуди струму анода не обмежується.

Не рекомендується зменшувати тривалість імпульсу струму анода до величин, співставних з часом комутації. Перевищення встановленої частоти повторення і тривалості імпульсів не допускається.

Допустима амплітуда зворотної напруги анода залежить від часу прикладення (після проходження імпульсу струму), форми і тривалості імпульсу зворотної напруги. Для випадків роботи в схемах лінійних модуляторів в довіднику приводиться максимальне значення зворотної напруги протягом певного часу (звичайно перші 25μс) після проходження імпульсу струму.

Час запізнювання імпульсу струму анода по відношенню до імпульсу напруги сітки залежить від режиму застосування. Він збільшується із зменшенням напруги підігрівача, напруги і струму анода, частоти повторення імпульсів.

Розігрівання потужних імпульсних тиратронів до робочих температур вимагає значного часу, що обумовлено інерційністю теплових процесів.

Сучасні імпульсні тиратрони мають термін служби не менше 500 год. і можуть працювати при температурах навколишнього середовища від -60 до +70°C (іноді і вище), а також при зниженому тиску повітря навколишнього середовища.

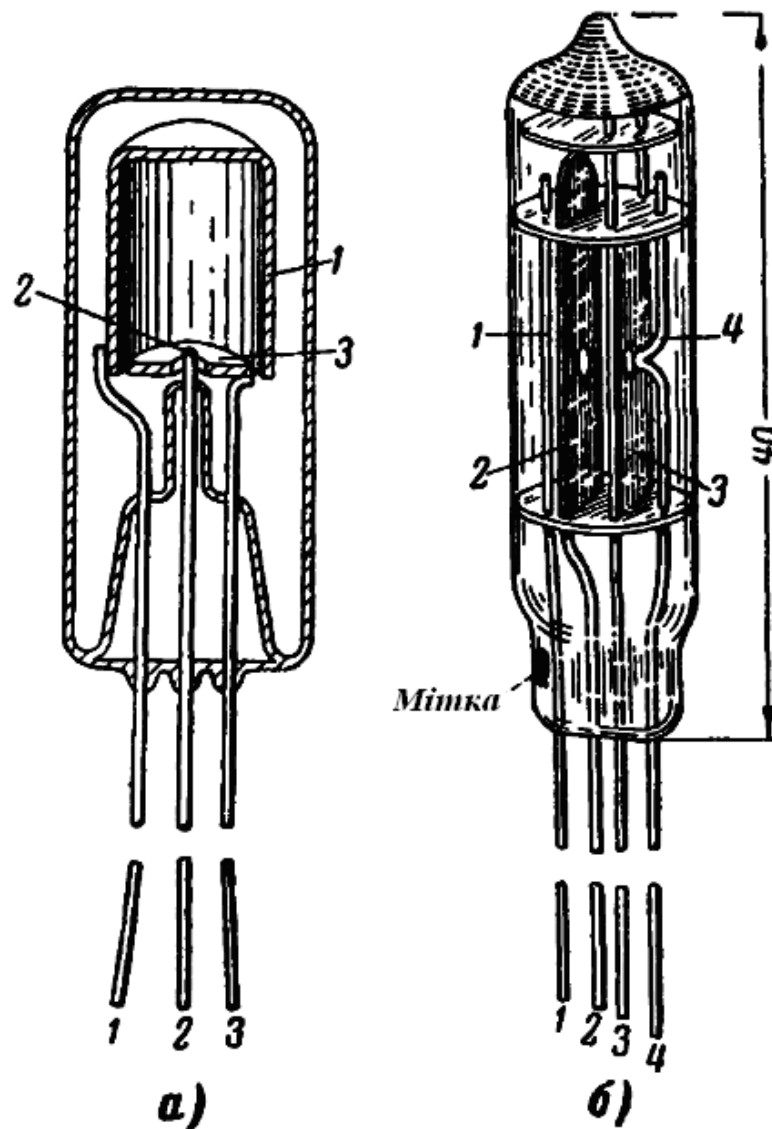
Тиратрони з холодним катодом

Тиратрони з холодним катодом (тиратрони тліючого розряду) є малопотужними керованими приладами з холодним катодом, призначеними для роботи в схемах автоматики, електронній імпульсній апаратурі, обчислювальних машинах, релаксаційних генераторах і інших пристроях малої потужності.

Відмінностей в принципах дії тиратронів з холодним і підігрівним катодом немає, за винятком того, що в тиратронах з холодним катодом виникає самостійний тліючий, а не дуговий розряд.

Тиратрон тліючого розряду є скляним малогабаритним балоном, наповненим одним або сумішшю інертних газів під низьким тиском (20÷30 мм рт. ст.), у якому поміщені анод, один або два управляючих електродів (сіток) і

холодний катод, що не нагрівається. На рис. 1.48, а і б показані дві конструкції електродів тиратрона тліючого розряду.



а — тиратрон типу МТХ90 (1 — катод; 2 — анод; 3 — сітка або пусковий електрод); б — тиратрон ТХЗБ і ТХ4Б (1 — анод; 2 — друга сітка; 3 — перша сітка; 4 — катод);

Рисунок 1.48 – Конструкція тиратронів тліючого розряду

Відстані між електродами і тиск газу підібрані так, що розряд між сіткою і катодом виникає при нижчій напрузі, ніж розряд між анодом і катодом, а потім (розряд) переходить на анод, якщо тільки напруга на аноді має достатню величину. При цьому розряд в проміжку сітка – катод характеризується малими струмами усього лише близько декількох одиниць або десятків мікроампер, а

струм головного розряду між анодом і катодом може бути в тисячі разів більшим.

Сучасні типи тиратронів тліючого розряду виконуються з чисто металевими катодами (з молібдену і титану), які забезпечує високу стабільність їх роботи і велику довговічність, і з активованими катодами, що представляють металеву підставу (кern), покриту активним шаром лужних, лужноземельних металів (барію, кальцію, цезію) і їх оксидів. Прилади з активованими катодами забезпечують менші напруги запалення і горіння розряду, але є менш стабільними і довговічними. Анод є молібденовим стрижнем, поміщеним в скляну трубку з виступаючим з скла вільним кінцем. Сітка виготовлена з нікелю, має форму диска з центральним отвором і розташована між анодом і катодом.

Для тиратронів з холодним катодом пускова характеристика (залежність напруги запалення тиратрона (U_3) від сили струму в ланцюзі сітки I_C) показана на графіку (рис. 1.49), яка ще називається характеристикою переходу.

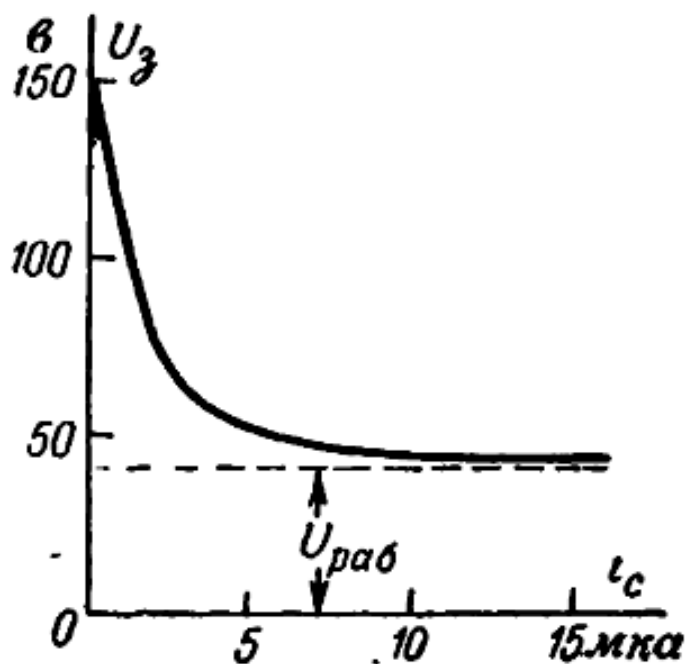


Рисунок 1.49 – Пускова характеристика тиратрона з холодним катодом

За відсутності струму в ланцюзі сітки анодна напруга запалення має найбільшу величину. Зростання струму i_C викликає зниження U_3 , спочатку

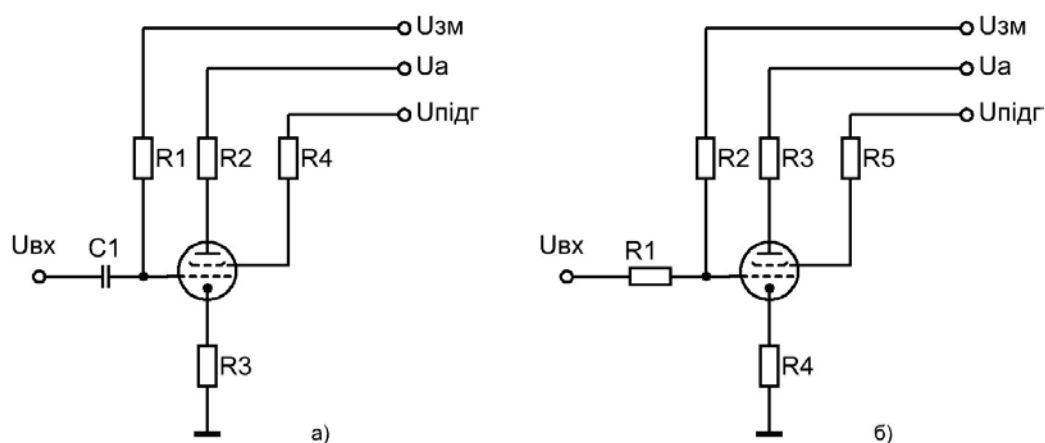
різке, а потім повільніше. Проте величина U_3 , не може стати менше за те робоче падіння напруги $U_{РАБ}$, яке необхідне для підтримки тліючого розряду між анодом і катодом. Пускова характеристика залежить також від роду газу, його тиску, форми електродів, їх матеріалу і стану їх поверхні. Струм в анодному ланцюзі не можна регулювати зміною напруги на сітці. Його можна припинити тільки зменшенням анодної напруги до величини нижчої за напругу згасання, яке звичайно лише трохи менше, чим $U_{раб}$. Таким чином, в цих тиратронах, як і в тиратронах дугового розряду, після виникнення головного розряду в анодному ланцюзі управляюча сітка втрачає свою дію.

Управління запаленням в ТХК здійснюється двома методами: струмовим – зміною струму в ланцюзі управляючого електроду і потенційним – зміною потенціалу на управляючому електроді.

Потенційне управління характерне для тиратронів з двома управляючими електродами (сітками). У двосіткових тиратронах перша сітка забезпечує підготовчий розряд, який полегшує і стабілізує процес запалення розряду в анодному ланцюзі. Через неї безперервно протікає струм, обмежений послідовно включеним опором. Друга сітка служить для управління напругою запалення при певній незмінній напрузі на аноді. На неї подається позитивна щодо катода напруга зсуву, менша ніж напруга на першій сітці, але недостатня для відкриття тиратрона. Для відкриття тиратрона на другу сітку через розділовий конденсатор подається пусковий позитивний імпульс достатньої амплітуди і тривалості.

В порівнянні з односітковими тиратронами у двосіткових режим управління і характеристика запалення стабільніші.

Принципова схема включення тиратрона тліючого розряду для потенційного методу управління показана на рис. 1.50.



а — управління імпульсними сигналами; б — управління зміною рівня постійної напруги

Рисунок 1.50 – Типові схеми включення ТТР з потенційним управлінням

Управління струмом характерне для тиратронів з одним управляючим електродом (сіткою). На сітку подається певна напруга, чим забезпечується величина струму підготовчого режиму, що визначається обмежувальним опором в ланцюзі сітки (до десятків МОм). Між сіткою і катодом встановлюється самостійний тихий розряд, після чого можна управляти моментом запалення тиратрона, подаючи на анод відповідну напругу.

У таких тиратронах вхідний сигнал подається на ту ж сітку, яка служить для створення підготовчого розряду (рис. 1.51а), отже управління струмом здійснюється в тріодній схемі включення тиратрону.

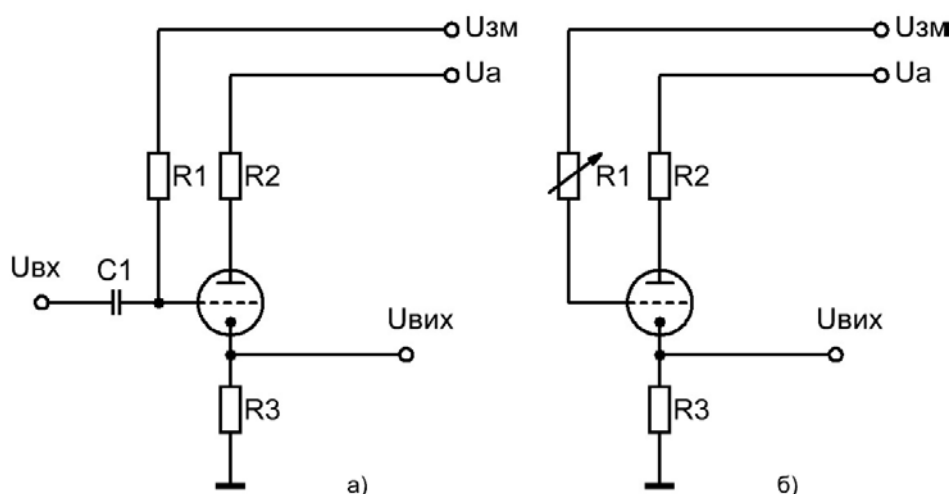


Рисунок 1.51 – Типові схеми включення тиратронів тліючого розряду із управлінням струмом

Зміна сіткового струму може також здійснюватися зміною опору резистора R (якого—небудь датчика), включеного в сітковий ланцюг (рис. 1.51б). У групу тиратронів із управлінням струмом входять ТХ4Б в тріодному режимі, ТХ5Б, ТХ11Г, МТХ90. Тиратрони із управлінням струмом мають високу чутливість до імпульсних вхідних сигналів.

Із збільшенням тривалості імпульсу вхідного сигналу необхідна сумарна напруга відкриття сітки зменшується, наближаючись до величини статичної напруги відкриття тиратрону.

Імпульсні характеристики залежать від тривалості і форми імпульсів. Звичайно приводяться характеристики для вхідних імпульсів прямокутної форми, тривалість яких повинна указуватися.

При використанні тиратрона тліючого розряду необхідно враховувати, що незалежно від основного призначення тиратрон тліючого розряду може бути елементом пам'яті, індикатором, а також підсилювачем струму і напруги і нормалізатором сигналів.

«Пам'ять» тиратрона визначається його здатністю зберігати один із стійких станів після припинення управляючого сигналу.

При виникненні в проміжку анод – катод основного розряду виникає великий перепад напруги на опорі резистора навантаження, приєднаного послідовно до тиратрону, оскільки напруга підтримки розряду тиратрона тліючого розряду може бути значно нижче за напругу виникнення розряду. Оскільки запалення тиратрона викликається невеликою зміною напруги сітки при подачі сигналу, підсилення напруги визначається співвідношенням зміни падіння напруги на навантаженні і зміни напруги сітки.

Нормалізація сигналів за допомогою ТТР приводить до того, що параметри вихідного сигналу тиратрона перестають залежати від параметрів вхідного сигналу.

Тиратрони які часто застосовуються для здійснення логічних операцій І, АБО, НІ (ЗАБОРОНА), ЗАТРИМКА, ПАМ'ЯТЬ називаються логитронами.

Логитрони – це багатоелектродні тиратрони, що виконують логічні функції. Відрізняються логитрони від тетродів тліючого розряду з електростатичною системою управління головним чином розвиненішою сітковою системою, конкретне виконання якої залежить від логічної операції, що виконується логитроном.

Логічні тиратрони управляються електростатичним способом. Тиратрон ТХ8Г виконує операцію І, тобто прилад запалюється під час дії вхідних сигналів одночасно на обидві управляючі сітки.

Операція ЗАБОРОНА виконується тиратроном ТХ7Г. Тиратрон запалюється під час дії вхідного сигналу на третю (вирішальну) сітку тільки в тому випадку, якщо на другій сітці (що забороняє) немає сигналу ЗАБОРОНА. Якщо ж на другу сітку поданий сигнал ЗАБОРОНА, основний розряд в проміжку анод – катод не запалюється.

Тиратрон ТХ9Г виконує операцію АБО на два входи. Цей прилад запалюється, коли вхідні сигнали подаються одночасно на дві управляючі сітки, в наступних варіантах: другу і третю сітки тиратрона, другу і четверту сітку або на всі три управляючі сітки. Отже, прилад ТХ9Г одночасно здійснює операцію І, тобто його функцію можна визначити як І–АБО.

Двоанодний тиратрон ТХ6Г є комбінацією двох приладів: один прилад проводить логічну операцію і запам'ятовує інформацію, а за допомогою другого приладу можна «прочитати» інформацію, що міститься в першому приладі. Це можливо завдяки тому, що друга частина тиратрона має свій розрядний проміжок, свою сітку, а катодом служить плазма основного розряду першого тиратрона.

При зчитуванні, на сітку другої частини тиратрона подається відкриваючий імпульс, але запалення другого тиратрона відбувається тільки в тому випадку, якщо до цього часу «відкритий» перший тиратрон.

Припинення або поява основного розряду в «тиратроні зчитування» не міняє стану першого тиратрона, тобто інформацію можна прочитувати без її стирання. Тиратрон ТХ6Г використовується в запам'ятовуючих пристроях.

Індикаторні тиратрони тліючого розряду

Останнім часом із загального класу тиратронів тліючого розряду виділився ряд приладів, практичне застосування яких носить чисто індикаторний характер – індикаторні тиратрони тліючого розряду. Індикаторні тиратрони тліючого розряду можуть бути використані для роботи в різних пристроях відображення інформації, як вихідні елементи візуального контролю, для створення одно– і багатоколірних мозаїчних табло, елементів цифро–буквенних модулів і т. і.

На відміну від інших індикаторів індикаторні тиратрони тліючого розряду дозволяють застосовувати їх в схемах, що виконують елементарні логічні операції, і одночасно перетворити електричний сигнал у візуальну інформацію за рахунок свічення, що виникає при розряді в інертному газі, який наповнює тиратрон. За принципом роботи індикаторні тиратрони тліючого розряду не відрізняються від тиратронів загального призначення, використовуваних при виконанні логічних операцій, тому, окрім чисто індикаторних функцій, на цих приладах можна збирати різні логічні схеми.

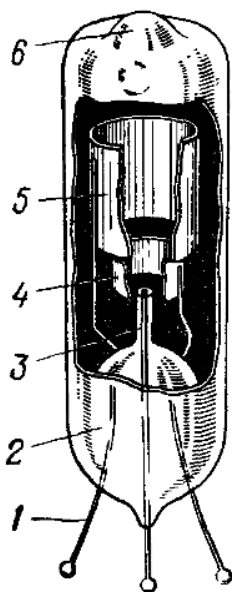
Індикаторні тиратрони тліючого розряду також мають «внутрішню пам'ять». Для виникнення розряду на сітку тиратрона необхідно подати низьковольтний управляючий сигнал, після виникнення розряду управляючий сигнал може бути відсутнім, а тиратрон буде (продовжувати світитися), тобто він «запам'ятовує» команду. Наявність «внутрішньої пам'яті» виявляється дуже цінною властивістю при побудові апаратури відображення інформації, оскільки відпадає необхідність в спеціальних пристроях, які зберігають сигнали управління.

Для індикаторних тиратронів тліючого розряду характерні наступні властивості:

- вони можуть знаходитися в одному з двох стійких станів – провідному і непровідному;
- використовуватися в режимі «з пам'яттю» (індикаторний тиратрон продовжує світитися при знятті управляючого сигналу) і «без пам'яті» (свічення припиняється за відсутності управляючого сигналу або сигналів);
- можуть виконувати функції «логічного елементу» з декількома входами.

Конструктивно індикаторний тиратрон тліючого розряду виконується у вигляді мініатюрного або надмініатюрного багателектродного приладу в скляному балоні і з гнучкими висновками.

Торець балона у тиратронів типів МТХ-90, ТХ-16Б, ТХ-17А, ТХ-19А (рис. 1.52) виконаний у вигляді лінзи.



1 — виведення електродів; 2 — скляний балон; 3 — анод; 4 — сітка; 5 — катод; 6 — лінза.

Рисунок 1.52 – Зовнішній вигляд і конструкція тиратрона МТХ-90

Індикаторне свічення, сфокусоване лінзою, спостерігається через купол (торець) балона.

Катод виконується у вигляді металевого циліндра, активованого цезієм, анод є молібденовим стрижнем, поміщеним в скляну трубку з виступаючим зі скла вільним кінцем. Сітка виготовлена з нікелю і має форму диска з центральним отвором (розташована між анодом і катодом). Наповнювачем індикаторних тиратронів служать інертні гази (неон, суміш неону з аргоном і ін.).

Індикаторні тиратрони (ТХ–5Б, МТХ–90) із управлінням запаленням за допомогою струма характеризуються тим, що запалення тиратрона здійснюється збільшенням сіткового струму. Вхідний імпульсний сигнал при цьому подається на одну сітку, яка одночасно служить і для створення підготовчого розряду.

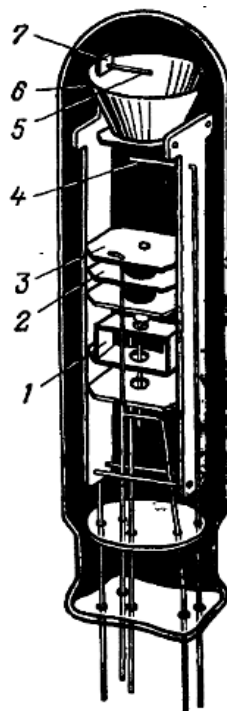
У робочих режимах індикаторних тиратронів час запізнювання зменшується із зростанням амплітуди вхідного сигналу. Для індикаторних тиратронів дуже важливо, щоб свічення, яке викликається підготовчим розрядом, не було видимим, бо при побудові великих табло навіть слабе свічення знижує рівень контрастності між індикаторами, що горять і згашеними.

У двохсітковому індикаторному тиратроні нижня сітка є анодом для підготовчого розряду, а друга (верхня) сітка – управляюча. На неї подається негативна по відношенню до першої сітки напруга зсуву, тому основний розряд не виникає. З приходом на другу сітку позитивної напруги тиратрон відкривається.

Спосіб відкриття індикаторного тиратрона шляхом заміни негативного поля в проміжку між двома сітками позитивним називається електростатичним методом управління. Індикаторні тиратрони типів ТХ–16Б, ТХ–17А, ТХ–19А з електростатичним управлінням включаються подачею певної позитивної імпульсної або постійної напруги на другу управляючу сітку.

Як приклад розглянемо принцип роботи тиратрона типу ТХ–17А з негативною характеристикою запалення, конструкція якого приведена на рис. 1.53. На підкатод через обмежувальний резистор подається негативна напруга, під дією якої між катодом і підкатодом виникає і підтримується підготовчий розряд. Катод основного розряду служить анодом для підготовчого розряду. На сітку подається негативна напруга, граничне значення якої нормується в технічних умовах. На анод пам'яті і анод свічення подається позитивна напруга.

Через отвір в катоді електрони з плазми підготовчого розряду попадають в область негативного гальмуючого поля сітки. При зменшенні негативної напруги сітки електрони проникають крізь отвір управляючої сітки і викликають перехід розряду на анод пам'яті. Виниклий там розряд, майже не видний через купол балона, приводить до появи розряду на аноді свічення. При цьому через лінзу в скляному куполі добре видно свічення червоного кольору. Яскравість свічення при горінні анодного розряду у багато разів перевищує яскравість свічення підготовчого розряду.



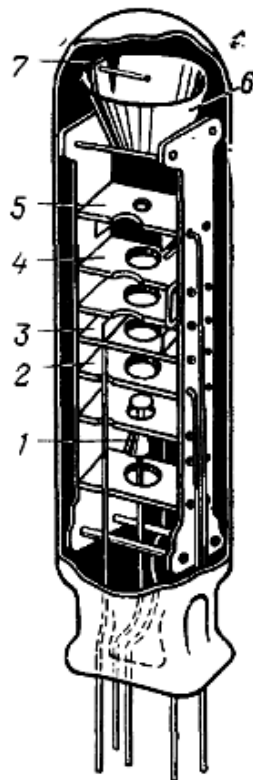
- 1 — підкатод; 2 — катод; 3 — сітка; 4 — анод пам'яті; 5 — анод свічення;
6 — екран; 7 — анод свічення.

Рисунок 1.53 – Внешний вид и конструкция тиратрона ТХ–17А

Принцип роботи тиратрона ТХ–16Б не відрізняється від описаного вище для ТХ–17А. Але у тиратрона ТХ–16Б видиме червоне свічення створюється розрядом в інертному газі (неоні), що має спектр випромінювання у видимій частині, а в тиратроні ТХ–17А спектр випромінювання розряду знаходиться в ультрафіолетовій частині за рахунок складу газу (суміш неону з аргоном).

Видиме випромінювання в ТХ–17А виникає з конусної поверхні екрану, покритого люмінофором, що створює зелений колір свічення. Наносячи різні люмінофори на поверхню екрану, можна одержати індикаторні тиратрони з різним кольором свічення.

Як приклад індикаторного тиратрона з позитивною характеристикою запалення розглянемо тиратрон ТХ–І9А (рис. 1.54), що також має дві управляючі сітки.



1 — підкатод; 2 — сітка перша; 3 — сітка друга; 4 — катод; 5 — анод пам'яті; 6 — екран; 7 — анод свічення.

Рисунок 1.54 – Зовнішній вигляд і конструкція тиратрона типу ТХ–І9А

На підкатод через обмежувальний резистор подається негативна напруга джерела живлення ланцюга підготовчого розряду. Катод заземляється, а на анод пам'яті і анод свічення поступають позитивні напруги. При позитивній напрузі на одній або двох управляючих сітках тиратрон закритий. Підготовчий розряд горить між управляючими сітками і підкатодом. Сітка, що має найбільший потенціал, служить анодом підготовчого розряду. Її потенціалом визначається потенціал джерела початкових електронів. Катод знаходиться під нижчим потенціалом і гальмує рух електронів до анода пам'яті. При зменшенні позитивної напруги на обох сітках гальмуюче поле катода слабшає і вся більша кількість електронів проникає в область анода пам'яті. Розряд, що утворюється на аноді пам'яті, приводить до запалення розряду на аноді свічення. Виникаюче при цьому ультрафіолетове випромінювання викликає свічення люмінофора, нанесеного на конічний екран, що розміщений між анодом пам'яті і анодом свічення і знаходиться під вільним потенціалом. Зменшення позитивної напруги тільки на одній сітці не викликає запалення тиратрона.

Анодний струм тиратрона і, отже, параметри вихідного сигналу не залежать ні від способу управління запаленням, ні від параметрів вхідного сигналу. Після запалення між анодом і катодом тиратрона встановлюється певна напруга горіння, яка трохи змінюється із зміною струму в анодному ланцюзі.

У засвіченому стані індикаторний тиратрон може знаходитися протягом тривалого часу (до приходу імпульсу гасіння) і, отже, виконує функції елементу пам'яті. Оскільки сітки, що управляють, можуть бути використані лише для запалення тиратрона, то його гасіння можна здійснити тільки зменшенням напруги між анодом і катодом. Для цього необхідно прикласти або негативний імпульс до анода, або позитивний до катода.

При роботі тиратрона в режимах, передбачених технічними умовами, довговічність їх може складати десятки тисяч годин. Такий великий термін

служби обумовлений тим, що процеси, що приводять до зміни параметрів, протікають з малою швидкістю.

Умовне позначення індикаторних тиратронів згідно ГОСТ 13393–67 складається з наступних елементів: літер ТХ, що позначають тиратрон з холодним катодом; цифр, які вказують на номер розробки даного типа тиратрона (наприклад, ТХ–5Б, ТХ–16А); літера за номером розробки, визначає конструкцію балона (Б – надмініатюрне скляне оформлення з діаметром балона до 10 мм, Г – те ж з діаметром балона понад 10 мм), а літера, наступна за нею, характеризує колір свічення тиратрона (наприклад, ТХ–19АЖ – жовтий, ТХ–19АК – червоний, ТХ–19АЗ – зелений).

Діаметр існуючих надмініатюрних тиратронів типів ТХ–17А і ТХ–19А дозволяє створювати трибарвні тріади для мозаїчних табло відображення різної інформації. До останнього часу подібні табло створювалися на тиратронах типу МТХ–90 або ТХ–16Б і мали оранжево–червоний колір свічення.

У корпусі трибарвної тріади для кольорових індикаторних тиратронів до складу одного осередку входять три тиратрони з трьома різними кольорами свічення: червоним, синім і зеленим. Мозаїчне табло, складене з кольорових тиратронів, дозволяє відобразити повнокольорову динамічну інформацію.

Таким чином, застосування індикаторних тиратронів в пристроях відображення обумовлене наступними їх перевагами: довговічністю до 5000 год; різними кольорами свічення (зеленим, жовтим, червоним); мініатюрністю (діаметр балона близько 7 мм і менше); наявністю внутрішньої пам'яті; простотою схем управління індикаторних тиратронів, можливістю виконання логічних функцій.

В той же час індикаторні тиратрони мають ряд недоліків: висока анодна напруга; необхідність охолодження (у разі одночасного застосування великої кількості індикаторних тиратронів в крупних табло); складність перепаявання при зміні індикаторного тиратрона, що вийшов з ладу.

Для забезпечення гарантованої довговічності роботи індикаторних тиратронів слід дотримувати перераховані нижче рекомендації: умови

експлуатації тиратронів повинні бути оптимальними і відповідати рекомендованим з урахуванням можливого розкиду характеристик запалення зокрема, режим живлення повинен бути таким, щоб тиратрони не запалювалися, якщо вхідний сигнал менше встановленого значення.

При першому включенні схеми з індикаторними тиратронами рекомендується наступний порядок подачі напруги на електроди: спочатку подається напруга зсуву на управляючі сітки, потім напругу підготовчого розряду і вже згодом напругу анода.

При недотриманні порядку подачі напруги при включенні і відключенні тиратрона нормальна його робота порушується і знижується гарантована довговічність роботи тиратрона.

Щоб гасіння основного розряду було надійним, інтервал час зниження напруги анода повинен бути більше, ніж час відновлення електричної міцності тиратрона.

Після тривалої перерви в роботі тиратрона рекомендується проводити попереднє короткочасне (близько однієї хвилини) тренування – витримку приладу в робочому режимі.

Екзітрони

Одним з видів керованих газорозрядних приладів великої потужності є екзітрон. Потужні екзітрони в суцільнометалевому виконанні випускаються на середні анодні струми близько сотень і тисяч ампер і зворотні напруги до декількох тисяч, що допускаються, вольт.

Схема екзітрона приведена на рис. 1.55

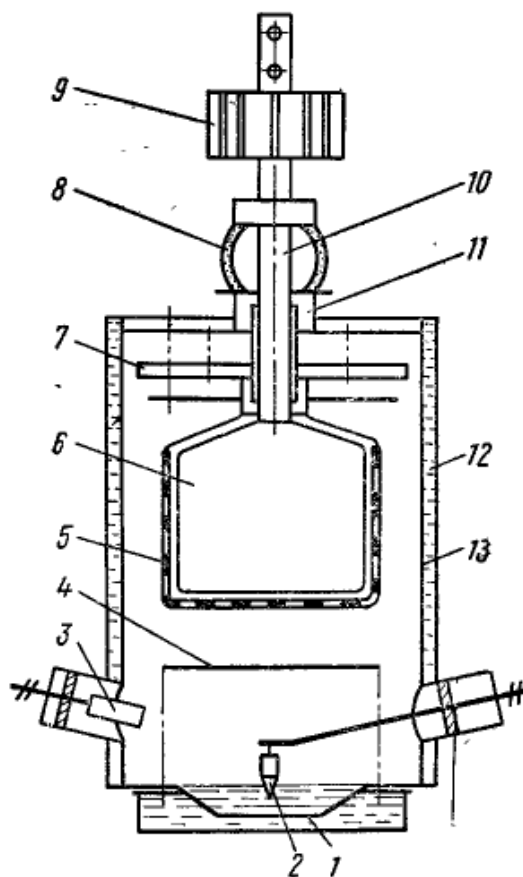


Рисунок 1.55 – Схема екзітрона

У екзітроне катод 1 приварений безпосередньо до корпусу 13, що значно спрощує конструкцію катодного вузла і вентиля в цілому. Екзітрон має один анод збудження 3, який живлять постійним струмом, напівпровідниковий палій 2 з карбіду бору, графітовий катодний щиток – екран 4 і управляючу сітку 5, що оточує анод 6. Катод охолоджується очищеною проточною водою, яка поступає далі в спіралеподібний канал 12 для охолодження корпусу. На рис. 1.55 спіралеподібний охолоджувальний канал умовно показаний у вигляді загального кожуха. Катодний щиток захищає катод від нагріву ртуті за рахунок тепловипромінювання анода, температура якого може досягати $500 \div 700^{\circ}\text{C}$. Він також захищає анод від попадання на нього ртутних бризок катода, що утворюються в результаті інтенсивного випаровування ртуті при перевантаженнях вентиля. Одночасно катодний щиток служить деіонізаційним електродом. У провідну частину періоду він заряджається електронами плазми, що знаходяться поблизу анода, а в непровідну частину періоду ці електрони

рекомбінують з позитивними іонами залишкової плазми, які рухаються до анода. Деіонізація залишкової плазми в непровідну частину періоду зменшує кількість позитивних іонів, що потрапляють на анод, і таким чином, ослабляє вторинну електронну емісію з анода. Це приводить до зменшення зворотного струму екзітрона і запобігає виникненню зворотних запалень. Анод ізолюється від металевого корпусу за допомогою кварцового або скляного ізолятора 8, що має форму, близьку до циліндричної. Анодний ізолятор своїм нижнім торцем припаяний до металевого проміжного циліндра 11, який приварений до верхньої кришки корпусу вентиля. Ізолятор щільно насаджений на анодний стрижень 10 і герметично до нього приварений. На верхній частині масивного анодного стрижня кріпиться радіатор 9, який розсіює тепло, що відводиться по стрижню від анода екзітрона. Частина анодного стрижня, що підноситься над радіатором, служить анодним виведенням.

Через верхню частину корпусу проходить виведення управляючої сітки, умовно показане на рис. 1.55 штрих – пунктирною вертикальною лінією. Сітка виконана з графіту. Бічні стінки сітки і її нижній диск мають отвори для проходу електронів на анод. Наявність отворів на бічних стінках сітки сприяє більш рівномірному розподілу електронного потоку по всій поверхні анода. Крім того, через ці отвори відводиться теплова енергія від анода шляхом випромінювання.

Над анодом розташований тепловий екран 7, що захищає верхні частини вентиля, зокрема, ізолятори анодного і сіткового введень від нагріву за рахунок тепла випромінюваного анодом.

Інші типи сучасних потужних екзітронів мають подібну конструкцію. Наприклад, суцільнометалевий екзітрон типу ЭВУ–200 на середній анодний струм 200А і допустима зворотна напруга 3000В відрізняється від описаного вище екзітрона тим, що катод в ньому ізолюваний від металевого корпусу. Катодна пляма в цьому екзітроні фіксується на одному місці, що дозволяє одержати значний виграш в габаритних розмірах, вазі, потужності збудження, перевантажувальній здатності і інших якісних показниках. Габаритні розміри

таких екзітронів: найбільша висота 780 мм, найбільший діаметр 160 мм. Термін служби складає більше 10000 год, витрата охолоджуваної води – близько 10 л/с.

Протягом 10 сек допускається збільшення анодного струму до 600А. Падіння напруги в дузі при номінальному навантаженні не перевищує 25В. Найбільший час відновлення властивостей управляючої сітки складає близько 50 μ с при швидкості спаду анодного струму не більше 11 А/с.

Описані екзітрони допускають короткочасне підвищення анодного струму до 1500 А і розраховані на допустимі зворотні напруги не більше 3000В. Вони можуть бути використані для роботи як у випрямному, так і в інверторному режимах. Екзітрони застосовуються в потужних перетворювальних пристроях підвищеної напруги, а також для електроприводу потужних прокатних станів, важких металоріжучих верстатів, потужних перетворювачів частоти.

Ігнітрони

Ігнітрон [від лат. ignis — вогонь і *(елек)трон*] – одноанодний іонний прилад з ртутним катодом і керованим дуговим розрядом. Випускання електронів, що викликає основний дуговий розряд між анодом і катодом ігнітрона, відбувається при позитивній напрузі на аноді з одного або декількох ділянок катода, що яскраво світяться (катодних плям). Катодні плями створюються допоміжною дугою, яка утворюється періодично перед запаленням основної дуги пропусканням імпульсів струму амплітудою до декількох десятків ампер и тривалістю декілька μ с через запалювальний електрод.

Більшість промислових типів ігнітронів не є високовольтними приладами. Проте деякі з них знаходять широке застосування в силовій перетворювальній техніці завдяки високій перевантажувальній здатності.

На рис. 1.56, зображена конструкція потужного суцільнометалевого ігнітрона без ізоляції між катодом 3 і металевим корпусом 11. Відсутність

ізоляції обумовлена тим, що можливість утворення катодної плями на металевій стінці корпусу виключається, оскільки за короткий час існування біля запалювального електроду 4 і вільного переміщення по поверхні ртуті при горінні основної дуги воно не встигає перейти на металеву стінку корпусу. Навіть за наявності цівки ртуті на металевій стінці корпусу на ній не може утворитися катодна пляма завдяки малому падінню напруги в короткій ртутній дузі ігнітрона.

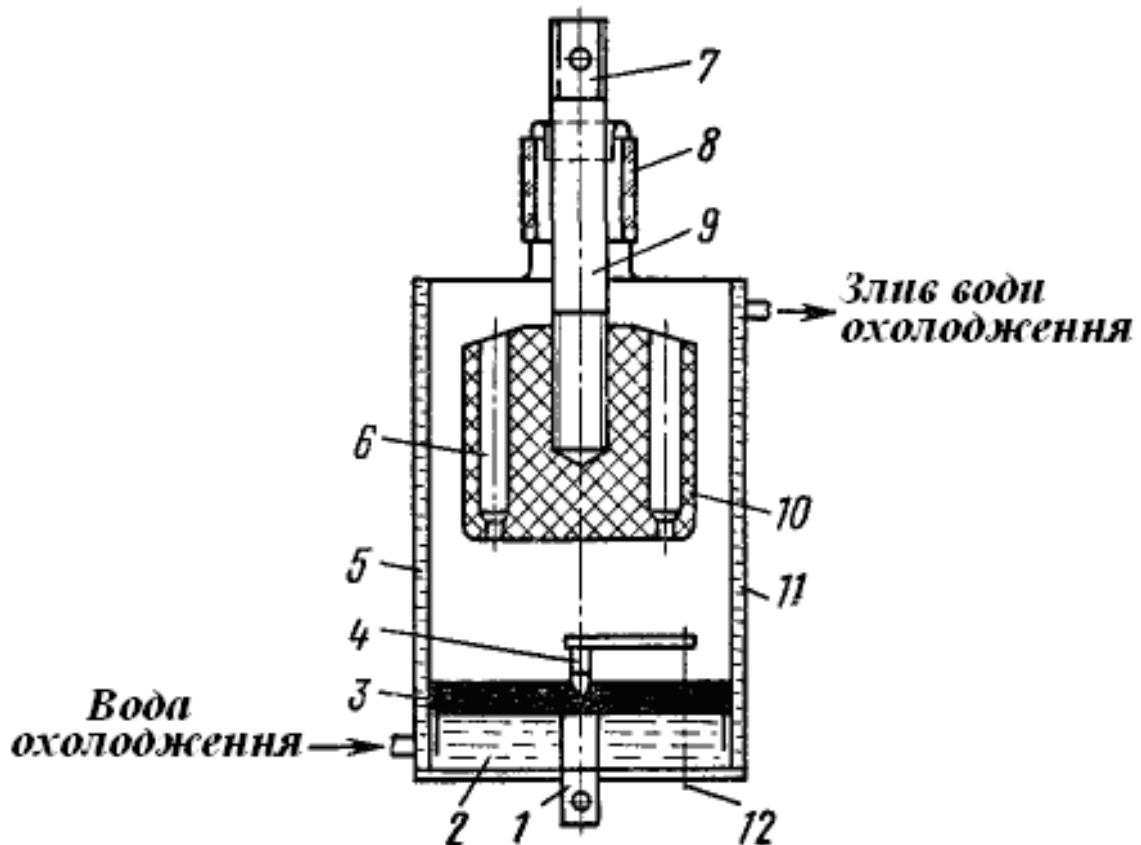


Рисунок 1.56 – Конструкція суцільнометалевого ігнітрона

Катодний вивід 1 приварюється до днища катода. Графітовий анод 10 циліндрової форми має декілька вертикальних проточок 6, призначених для зменшення його ваги і забезпечення виходу поглинених газів з об'єму анода під час тренування з відкачуванням і нагрівом. Сталевий масивний анодний стрижень 9 утвинчується в анодну головку. Від корпусу він ізолюваний циліндровим кварцовим анодним ізолятором 8. Анодним виведенням служить верхній кінець анодного стрижня 7, або гнучкий металевий джгут великого

перетину, упаяний в циліндрову вертикальну виточку в аноді. Напівпровідниковий палій має герметичне введення 12, що проходить через днище катода, який умовно показаний вертикальною штрих – пунктирною лінією. Палій кріпиться за допомогою металевої траверси до стрижня введення. Катод і корпус охолоджуються очищеною проточною водою, яка спочатку поступає в катодну водяну сорочку 2, а потім в сорочку корпусу 5.

Зовнішній вигляд ігнітрона описаної конструкції показаний на рис. 1.57.



Рисунок 1.57 – Зовнішній вигляд суцільнометалевого ігнітрона

Є декілька типів ігнітронів, подібної конструкції, наприклад, ігнітрон типу И1–350/0,8 розрахований на найбільший середній анодний струм 350А і допустима зворотна напруга 800В. Ігнітрони даного типа допускають 10÷15–кратне перевантаження по струму. Габаритні розміри таких ігнітронів: найбільша висота 480 мм, найбільший поперечний розмір 213 мм. Термін служби складає не менше 4000 ч.

Ігнітрони інших типів можуть мати два або три палії, а також управляючі сітки і допоміжні аноди різних призначень.

Високовольтний ігнітрон типу И1–50/20 розрахований на середній анодний струм 50А і максимально допустиму зворотну напругу 20кВ. Він має два палії і дві сітки. При тривалості одиночних імпульсів 15µс анодного струму високовольтного ігнітрона не повинен перевищувати 5000А. При середньому анодному струмі 50А і зворотній або прямій амплітудній напрузі 20кВ

допустима амплітуда анодного струму складає 150А. Приведені цифри характеризують не тільки високу перевантажувальну здатність високовольтних ігнітронів, але і можливість витримувати високі зворотні напруги.

Високовольтні ігнітрони призначаються для роботи у високовольтних випрямних пристроях середньої потужності, а також в схемах захисту радіотехнічних і інших високовольтних пристроїв.

Основна область застосування низьковольтних потужних ігнітронів – це контактна зварка, для якої висока імпульсна перевантажувальна здатність ігнітронів є важливою технічною якістю.

До переваг потужних ігнітронів слід також віднести простоту управління, високу енергетичну ефективність, малі габаритні розміри, невелику вагу. Недоліком ігнітронів є порівняно короткий термін служби (4000 ÷ 10 000 год.).

1.5.3 Газорозрядні прилади з схрещеними електричним та магнітним полями

Дослідження впливу поперечного магнітного поля на розряд в газах привело до створення ряду нових оригінальних високовольтних приладів з холодним катодом, простих по конструкції, здатних працювати з великими величинами робочих струмів. Слід додати, що всі вони мають великий термін служби. До таких приладів відносяться артатрон, індутрон, тріотрон, плазматрон тріотрон і ін.

Артатрон (рис. 1.58) є газорозрядним приладом з холодним катодом, між електродами якого створюються схрещені електричне і магнітне поля.

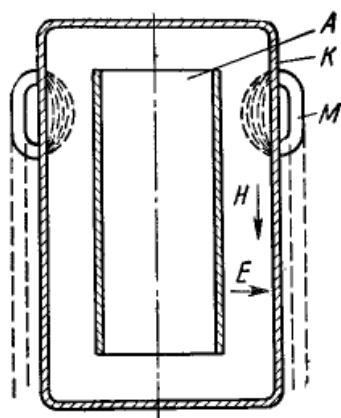


Рисунок 1.58 – Конструкція артатрону

Артатрон складається з двох порожнистих концентричних електродів: внутрішнього металевого циліндра – анода A і зовнішнього металевого циліндра – катода K , що виконує одночасно роль вакуумної судини. Навколо катода, виготовленого з немагнітного матеріалу, закріплені постійні магніти M , що створюють подовжнє щодо осі електродів біля катода магнітне поле (напруженістю H), яке з видаленням від катода швидко слабшає і біля анода практично відсутнє. Електричне поле (напруженістю E) усередині артатрона має радіальний напрям. Отже, в проміжку між електродами утворюються схрещені електричне і магнітне поля. На рис. 1.59 схематично показані поперечний розріз артатрона і траєкторія руху одного з електронів Pe . Магнітне поле показано точками.

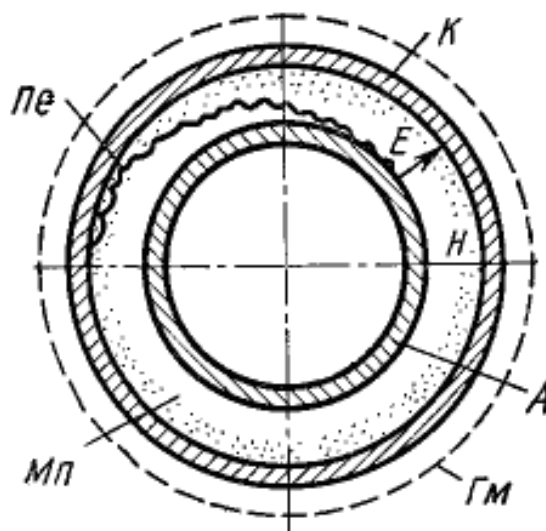


Рисунок 1.59 – Поперечный разрез артатрона

Відстань d між анодом A і катодом K вибирають таким, щоб воно було приблизно рівно або менше середньої довжини вільного пробігу електронів λ_e при даному робочому тиску газу в артатроні і відсутності магнітного поля. В цьому випадку велика частина електронів пролітає шлях до анода, не стикаючись з нейтральними молекулами газу і не іонізуючи їх. Слід відмітити, що до появи розряду в проміжку між електродами знаходиться дуже мало вільних електронів через відсутність електронної емісії з катода. Тому розряд за відсутності магнітного поля не виникає.

За наявності поперечного магнітного поля поблизу катода електрони здійснюють шлях Pe по циклоїдній траєкторії, яка значно довша за відстань d . В результаті з'являється можливість неодноразових зіткнень електронів з нейтральними молекулами газу і їх іонізація. Іонізація розвивається лавиноподібно не тільки за рахунок електронів, що вийшли з катода, але і за рахунок електронів, які виникають в процесі іонізації на прикатодній ділянці і в прилеглому до нього позитивному стовпі. Позитивні іони спрямовуються до катода і викликають вторинну електронну емісію, внаслідок чого виникає тліючий розряд.

З характеристики запалення (рис. 1.60) артатрона $U_3 = f(H)$, видно, що при збільшенні напруги запалення U_3 росте і напруженість магнітного поля H .

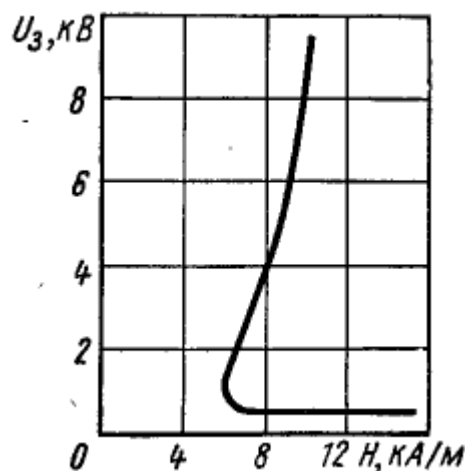


Рисунок 1.60 – Пускова характеристика артатрона

Інакше електрони потраплятимуть на анод, не здійснюючи іонізації, і розряд не виникне. Мінімальна величина напруги запалення U_3 не повинна бути менше напруги горіння розряду $U_{гор}$, при якому зміна напруженості H вже не впливає на напругу запалення. Величина H у високовольтних артатронах складає десятки тисяч А/м.

Вольт–амперна характеристика артатрона (рис. 1.61) приблизно відповідає вольт–амперній характеристиці тліючого розряду, причому після запалення приладу напруга горіння дорівнює $300 \div 400\text{В}$ і не залежить від величини анодного струму. При щільності струму, яка близька до 50А/см^2 , падіння напруги на приладі зменшується приблизно до 100В . Допустиме зворотні напруги артатрона складають $20 \div 100\text{кВ}$ і більше.

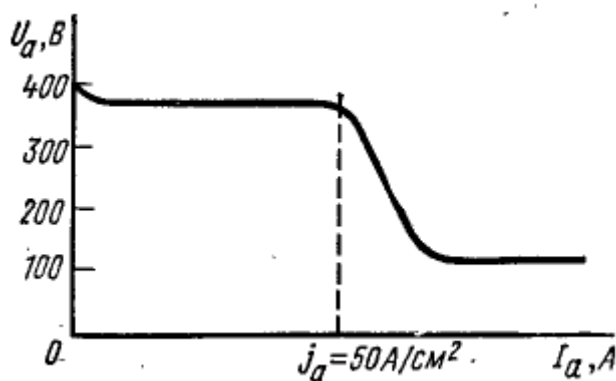
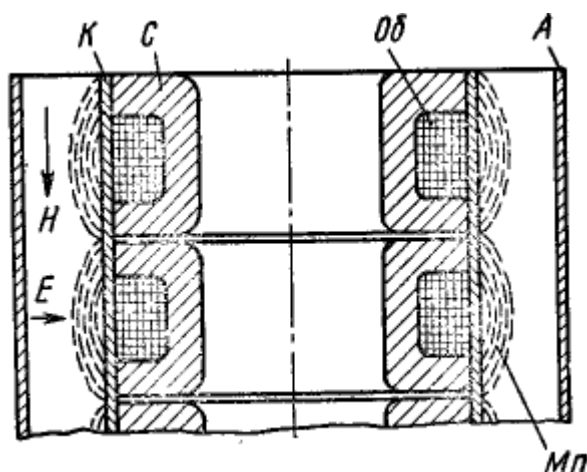


Рисунок 1.61 – Вольт–амперна характеристика артатрона

Дослідні, зразки артатронов працюють при анодних струмах в імпульсі близько 50кА і вище. При великих струмах тліючий розряд переходить в дуговий, що супроводжується прискореним розпилюванням і випаровуванням матеріалу катода.

Матеріал катода, який бомбардується позитивними іонами, повинен мати низьку роботу виходу для отримання інтенсивної вторинної електронної емісії і високу температуру випаровування, щоб зберігалася висока довговічність артатрона. Матеріал анода також повинен мати високу температуру випаровування, а його робота виходу повинна бути такою, щоб у несприятливий період не виникло помітної вторинної електронної емісії при бомбардуванні анода позитивними іонами залишкової плазми. У керованих артатронах постійні

магніти замінені електромагнітами (рис. 1.62), які розміщені усередині циліндрової порожнини катода.



A — анод, K — катод, C — сердечник електромагніту, $Об$ — обмотка електромагніту, Mn — магнітне поле.

Рисунок 1.62 – Подовжній розріз керованого артатрона

У керованих артатронах величина створюваного подовжнього магнітного поля регулюється шляхом зміни сили струму в котушках електромагнітів. Змінюючи таким шляхом величину магнітного потоку, можна у будь-який момент запалити або погасити розряд в артатроні. Можливість гасіння розряду в артатроні простим способом у будь-який момент часу є цінною технічною властивістю. Ця властивість може бути використана, наприклад, для поліпшення коефіцієнта потужності живлячої мережі при роботі артатрона як керованого вентиля.

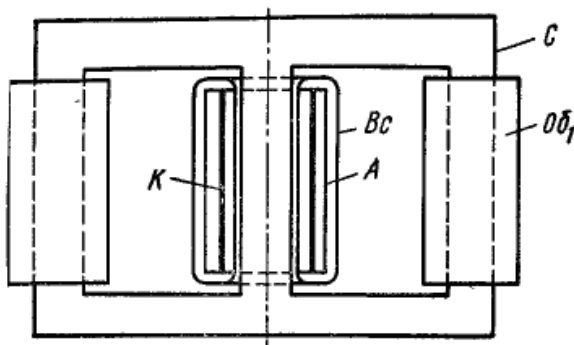
Артатрони характеризуються такою важливою властивістю приладів з холодним катодом, як миттєва готовність до дії. До їх переваг відноситься також відсутність електричного зв'язку між ланцюгом управління і ланцюгом розряду (силовий ланцюг), що особливо важливо для високовольтних приладів.

Разом з перевагами артатрони мають і істотні недоліки, до яких відносяться:

- велика потужність розсіювання із-за великої напруги горіння артатрона;
- велика потужність ланцюгів управління в керованих артатронах;
- низька енергетична ефективність;
- розпилювання матеріалу катода і його значний нагрів;
- перегрів котушок управління, що викликає погіршення їх ізоляції;
- нагрів струмами Фуко суцільних сталевих сердечників при зміні струму управління і ін.

Індутрон

Основні фізичні процеси у газорозрядному *інду т роні* (рис. 1.63) з холодним катодом такі же, як і в артатроні. Але індутрон істотно відрізняється від артатрона тим, що у нього немає окремого джерела магнітного поля, оскільки його катод сам створює необхідне магнітне поле, подовжнє по відношенню до осі приладу.



A — анод; K — катод; Bc — вакуумна судина кільцевої форми; $Об_1$ — первинна обмотка; C — сердечник

Рисунок 1.63 – Конструкція трансформаторного індутрона

У індуктивному катоді K , що є одним витком вторинної обмотки трансформатора, за рахунок протікання струму, створюється навколо поверхні катода магнітне поле розсіювання, а також цей же струм може використовуватися

для нагріву термоелектронного катода. При невеликих струмах в катоді можна одержати магнітне поле достатньої напруженості, що досягає $20 \div 30 \text{ кА/м}$. Катод при цьому може залишатися холодним. У індуктивному розжареному термоелектронному катоді напруженість магнітного поля розсіяння у поверхні досягає десятків кА/м .

Трансформатор індутрона зазвичай має з Ш-образний сердечник, два крайні стрижні використовують для розміщення котушок первинної обмотки $Об_1$ а на середньому – розміщується індутрон, що має скляну вакуумну судину $Вс$.

Управління струмом і магнітним полем розсіяння індуктивного катода здійснюється шляхом зміни величини або фази струму первинної обмотки трансформатора. Управляти термоелектронним індуктивним катодом можна тільки за допомогою зміни фази, оскільки зміна величини струму привела б до зміни температури нагріву катода.

Індуктивний катод в більшості випадків має циліндричну форму, можлива і інша порожниста, конструктивно більш зручна форма. Анод індутрона A повинен мати також циліндричну форму, якщо катод циліндричний. Анод будь-якої форми не повинен бути замкнутим електричним ланцюгом подібно до катода, щоб виключити проходження струму по тілу анода. Для цього суцільний анод необхідно розітнути уздовж його висоти. На рис. 1.64 показаний подовжній розріз індутрона.

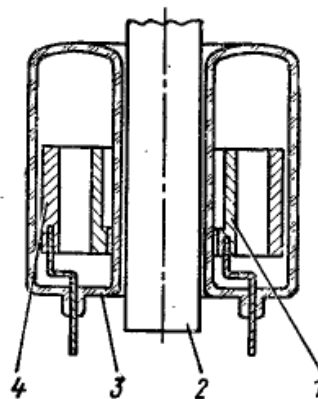


Рисунок 1.64 – Подовжній розріз індутрона

Циліндричні катод 1 і анод 4 виготовляють з міді або іншого немагнітного металу. Вакуумна скляна судина 3 має кільцеву форму. Індутрон розташовується на сердечнику трансформатора 2. Газовим наповненням індутрона служить водень. Для компенсації витрати водню, який безперервно поглинається матеріалами конструкції, всередину приладу розміщують генератор водню.

Індутрон має такі ж основні електричні характеристики і параметри, як і артатрон.

Маючи всі основні переваги артатрона, індутрон позбавлений його недоліків і має деякі додаткові переваги. До їх числа відносяться двофункціональність катода, висока надійність катодно–магнітного управління, менша, ніж у артатрона, потужність управління.

Проте у індутронов є і недоліки: можливість роботи індуктивного катода тільки на змінному струмі; невисока частота в ланцюзі управління; кільцева форма вакуумної колби; необхідність розшиховки ярма трансформатора для установки індутрона на його стрижень. Ці недоліки обмежують можливості використання індутронов для випрямлення змінного струму, інвертування постійного струму і т.і.

1.5.4 Керовані газорозрядні прилади з схрещеними електричним і магнітним полями

Описані вище артатрони і індутрони з магнітним управлінням мають істотні недоліки: велику інерційність магнітної системи управління і, отже, низьку частоту змін струму в анодному ланцюзі; значну потужність управління, що знижує енергетичну ефективність. Ці недоліки обмежують рамки доцільних застосувань артатронов і індутронов. Одним з шляхів усунення відмічених недоліків є використання управляючих електродів в даному класі приладів.

Конструкція *триотрона* (рис. 1.65) або артатрона з сітковим управлінням складається з: зовнішнього кільцевого постійного магніту 5, зовнішнього

циліндричного катоду з немагнітного матеріалу 2, циліндричної сітки 4 з кільцевою щілиною на середині висоти, розташовану між катодом і анодом, і внутрішнього циліндричного аноду 1. Прилад наповнений воднем, тиск якого за допомогою генератора водню підтримується постійним.

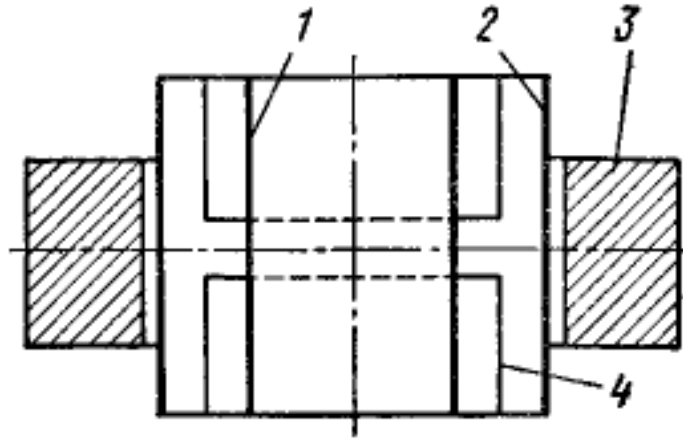


Рисунок 1.65 – Конструкція триотрона

Принцип дії триотрона полягає в наступному. У початковому стані за відсутності потенціалу на сітці розряд в лампі не виникає унаслідок екранування катодного простору від анода. При подачі позитивного потенціалу на сітку розподіл потенціалу між анодом і катодом змінюється і при деякій величині напруги на сітці триотрона U_c у приладі виникає розряд. Подальша робота триотрона аналогічна роботі некерованого артатрона. Сітка в триотроні використовується тільки для запалення розряду (аналогічно тиратрону).

На рис. 1.66 приведені статичні пускові характеристики $U_A=f(U_C)$ триотрона. Пускова характеристика триотрона позитивна і при збільшенні напруженості магнітного поля зрушується в область менших потенціалів на управляючому електроді.

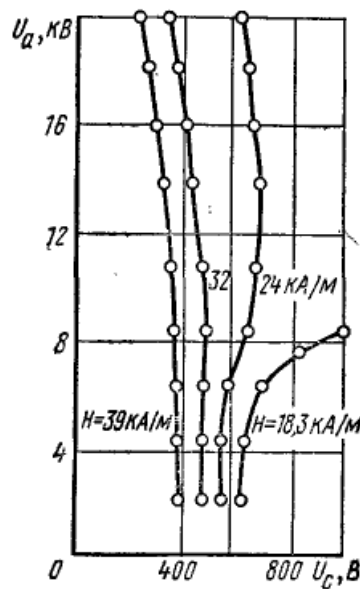


Рисунок 1.66 – Статичні пускові характеристики тріотрона

Аналогічно змінюється пускова характеристика і при зміні тиску газу (рис. 1.67). Положення пускових характеристик тріотронов, їх крутизна і форма залежать також від конструкції електродів і їх взаємного розташування. Слід зазначити, що при потенційному сітковому управлінні гасіння розряду за допомогою сітки неможливе.

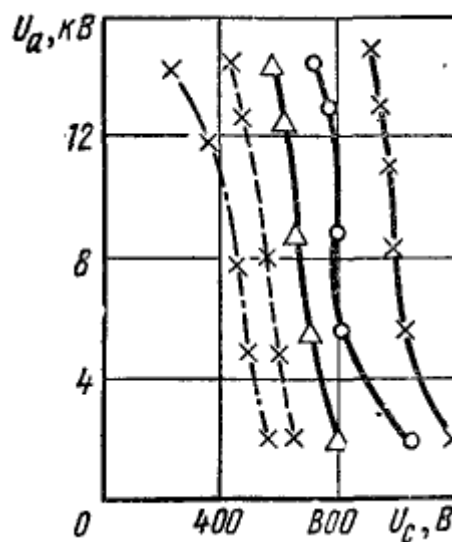


Рисунок 1.67 – Пускові характеристики тріотрона при різному тиску газу

Застосування в тріотронах потенційного сіткового управління призводить до різкого зниження їх інерційності, що дозволяє застосовувати тріотрони на високих частотах. Тривалість фронту імпульсу робочого струму тріотронов

складає 30–50 нс, а з введенням в прилад попередньої іонізації може бути зменшена до 5 нс.

На рис. 1.67 показані пускові характеристики сітково–керованого індутрона для різного тиску водню і напруженості магнітного поля біля катода, та різних величин первинних струмів, що характеризуються величинами I_1 індутронного трансформатора. Тиск водню в індутроні підтримується за допомогою генератора водню.

Використання сіткового потенційного управління без магнітного поля або спільно з ним перетворює газорозрядний прилад з схрещеними полями в більш гнучко керований прилад, знижує його інерційність і розширює можливості застосування.

До газорозрядних приладів з холодним катодом і схрещеними електричним і магнітними полями також відноситься прилад із струмовим управлінням за допомогою спеціального управляючого електроду. Конструкція такого приладу, так званого *тріо–плазматрону*, схематично показана на рис. 1.68, (6 — катод з торцями 7 і 4; 3 — анод дискової форми; 1 — кільцевий постійний магніт; 5 — циліндричний управляючий електрод (який створює підготовчий розряд).

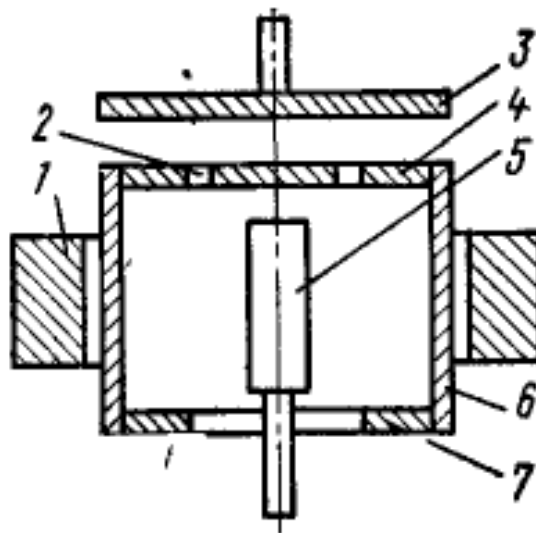


Рисунок 1.68 – Конструкція тріоплазматрона

Верхній торець 4 катоду з кільцевою щілиною 2 служить екраном між анодом і катодом, який утрудняє запалення між ними розряду. Між верхнім торцем катода і анодом розряд не може виникнути, оскільки відстань між ними менше середньої довжини вільного пробігу електрона при вибраному тиску водню.

Вся електродна система тріоплазматрону поміщена в балон з немагнітного матеріалу (на рис. 1.68 не показаний). Кільцевий магніт 1 встановлюється на цей балон зовні. При цьому відстань між катодом і кільцевим магнітом повинна бути мінімально можливою. Прилад наповнений воднем, тиск якого за допомогою генератора водню підтримується постійним.

Підготовчий розряд служить джерелом початкової іонізації для запалення основного розряду між катодом і анодом. Чим вище ступінь іонізації, що створюється підготовчим розрядом, тим при меншій анодній напрузі запалюється основний розряд. Регулюючи струм підготовчого розряду, що становить одиниці міліампер, можна змінювати напругу запалення основного розряду, вимірювану тисячами вольт. Струм підготовчого розряду повинен бути мінімальним, щоб розряд при високій напрузі між анодом і катодом не перекидався на анод.

На рис. 1.69 показано включення тріоплазматрона в схемі імпульсного модулятора: T — комутуючий водневий тріоплазматрон; Dp — зарядний дросель; ΦL — формуюча лінія; R_n — резистор навантаження; R_{orp} — обмежувальний резистор ($\tau_a = 1\mu c$, R_n — 150 Ом, f — 250 Гц). Запуск тріоплазматрона проводиться від спеціального джерела допоміжних імпульсів з амплітудою 650 В і тривалістю 3 μc . Передрозрядна напруга в тріоплазматронах складає 10÷15 кВ, а струм в імпульсі — 300÷500 А. Тріоплазматрони можуть мати і інші вихідні параметри і бути використані для інших цілей, зокрема, як керовані високовольтні розрядники в потужних радіотехнічних пристроях.

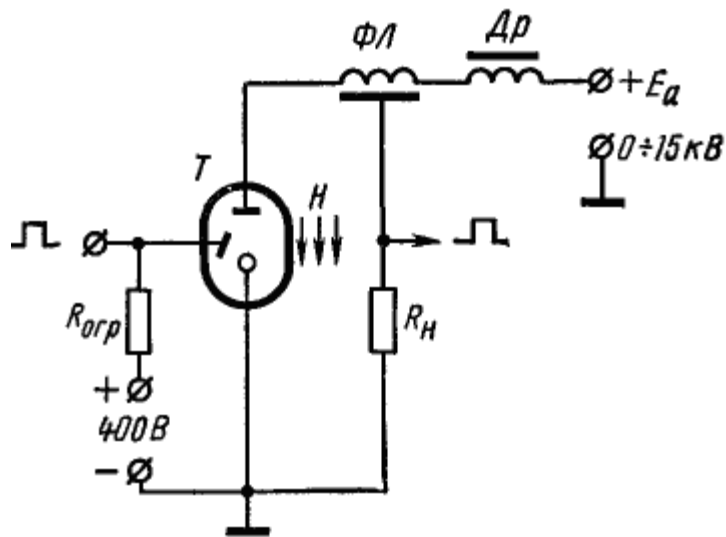


Рисунок 1.69 – Схема імпульсного модулятора на тріоплазматроні

Питання для самоконтролю і підготовки до тестування

1. Сформулюйте поняття фізичної субстанції - плазми
2. За якими параметрами проводиться класифікація плазми?
3. Поясніть фізичну суть дебаєвського радіусу екранування.
4. Чому плазму вважають четвертим станом речовини?
5. Поясніть чому в плазмі виникають коливання?
6. Чому плазма вважається квазінейтральною?
7. Сформулюйте поняття електричного розряду у газовому середовищі.
8. Які процеси йдуть у газовому середовищі при виникненні в ньому електричного розряду?
9. Сформулюйте поняття іонізації газу.
10. Сформулюйте поняття рекомбінації носіїв.
11. Перерахуйте основні види іонізації в газі.
12. Сформулюйте поняття іонізаційного пробігу частинки.
13. Якими параметрами характеризуються іонізаційні процеси в газовому середовищі?

14. Яким чином класифікуються електричні розряди в газовому середовищі?
15. Сформулюйте поняття несамостійних і самостійних електричних розрядів в газовому середовищі.
16. Сформулюйте поняття частоти іонізації і її зв'язок з першим коефіцієнтом Таундсенда.
17. Поясніть принцип виникнення лавинного розмноження носіїв в газовому середовищі.
18. Яка залежність зветься характеристикою запалення розряду?
19. Чому існує мінімальне значення напруги запалення розряду при певному тиску газу?
20. За якими характеристиками та параметрами класифікують електричні розряди в газовому середовищі?
21. Наведіть вольт-амперну характеристику газового розряду а також схему електричну принципову для її дослідження.
22. Поясніть, які види газових розрядів виникають на окремих ділянках вольт-амперної характеристики газового розряду.
23. Перерахуйте, які види газових розрядів відносяться до класу несамостійних і чому? При яких умовах виникають ці газові розряди?
24. Перерахуйте, які види газових розрядів відносяться до класу самостійних і чому? При яких умовах виникають ці газові розряди?
25. Сформулюйте поняття газорозрядного приладу.
26. За якими характеристиками і параметрами класифікують газорозрядні прилади?
27. Поясніть принцип дії і вольт-амперну характеристику газотрону. До якого класу газорозрядних приладів відноситься газотрон і які він має конструкції?
28. Які гази використовують для заповнення газотронів і чому?
29. Який вид розряду виникає в газотроні?

- 30.3 якою метою будують секційоновані газотрони?
31. Пояснить принцип дії і вольт-амперну характеристику стабілітрону.
До якого класу газорозрядних приладів відноситься стабілітрон?
32. Який вид розряду виникає в стабілітроні?
33. Які гази використовують для заповнення стабілітронів?
34. Які характеристики і параметри має стабілітрон?
35. Наведіть схему включення газорозрядного стабілітрона тліючого розряду і поясніть принцип її дії.
36. Сформулюйте поняття коефіцієнта стабілізації схеми з газорозрядним стабілітроном тліючого розряду.
37. Як залежить коефіцієнт стабілізації схеми з газорозрядним стабілітроном тліючого розряду від відношення додаткового опору стабілітрона до його внутрішнього опору?
38. Які газорозрядні прилади відносяться до класу індикаторних?
39. Навколо якого електроду відбувається свічення в неонових лампах?
40. Приведіть і поясніть конструкцію індикаторного газорозрядного пристрою?
41. Який вид газового розряду використовується в індикаторних газорозрядних пристроях?
42. Перерахуйте робочі параметри індикаторного газорозрядного пристрою.
43. Від якого технологічного параметру залежить колір свічення індикаторного газорозрядного пристрою?
44. Яку конструкцію мають повно-кольорові індикаторні газорозрядні пристрої?
45. Чим відрізняються знакові індикатори від неонових ламп?
46. Опишіть конструкцію і поясніть принцип дії лінійного газового індикатора.
47. У чому різниця в принципі дії між лінійними і дискретними газовими індикаторами?

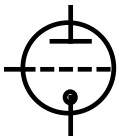
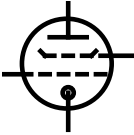
48. До класу яких газорозрядних приладів відносяться розрядники?
49. Який вид газового розряду використовують в розрядниках?
50. Які вимоги пред'являють до характеристик і параметрів розрядника?
51. Чому газові розрядники заповнюють воднем?
52. Де використовують газові розрядники?
53. Які газорозрядні прилади відносяться до класу керованих газорозрядних приладів?
54. За допомогою яких електродів виконується управління моментом виникнення газового розряду?
55. Опишіть конструкцію і поясніть принцип дії тиратрону?
56. За якими ознаками класифікують тиратрони?
57. Які основні параметри і характеристики має тиратрон?
58. Яким чином залежать параметри тиратрону від розмірів його електродної системи?
59. Сформулюйте поняття пускової характеристики тиратрону.
60. Які пускові характеристики тиратрону можуть бути (з точки зору їх розташування відносно початку координат)?
61. Як залежить розташування пускових характеристик тиратрону від температури, робочої частоти, величини сіткового резистору?
62. З якою метою до складу конструкції тиратрону вводять екрануючу сітку?
63. Чим, з точки зору конструкції та параметрів, відрізняються імпульсні тиратрони від звичайних?
64. Чому імпульсні тиратрони мають водневе наповнення?
65. Перерахуйте особливості експлуатації імпульсних тиратронів.
66. Які відмінності в принципах дії і конструкції мають тиратрони з холодним катодом?
67. Який вид газового розряду виникає в тиратроні з холодним катодом?

68. Сформулюйте поняття пускової характеристики для тиратрона з холодним катодом.
69. Якими методами здійснюється управління запаленням розряду в тиратроні з холодним катодом?
70. Поясніть чому окрему групу тиратронів з холодним катодом називають логітронами?
71. Приведіть конструкцію і пояснить принцип дії екзітрона та ігнітрона?
72. Який вид розряду виникає в екзітроні та ігнітроні?
73. Яке заповнення електродної системи має екзітрон?
74. Перерахуйте переваги та недоліки екзітрону, а також області його використання.
75. Перерахуйте переваги та недоліки ігнітрону, а також області його використання.

Додаток 1

Умовно – графічні позначення (УГП) газорозрядних приладів

Таблиця 1

Тип приладу	УГП
Неонова лампа	
Двоанодний газотрон	
Односітковий тиратрон з холодним катодом	
Двосітковий тиратрон з холодним катодом	
Односітковий тиратрон з катодом прямого нагріву	
Стабілітрон (стабілізатор напруги)	

Рекомендована література

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Наука, М. 1992. 536 с.
2. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А. Основы физики плазмы. М.. Атомиздат. 1977. 384 с.
3. Смирнов Б.М. Введение в физику плазмы. М., Наука, 1975. 175с.
4. Б.М. Смирнов, Физика слабоионизованного газа . М.: Наука, 1978.
5. Г.В. Ступаков, И.А. Котельников, Основы физики плазмы. Новосибирск: НГУ, 1997
6. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М. Атомиздат 1979 г. 315 с.
7. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. Атомиздат. М. 1964. 283с.
8. Фортов В.Е., Якубов И.Т. Неидеальная плазма. М.: Энергоатомиздат. 1994.
9. , В. С. Григорьев и Б. С. Григорьев, Электронные и ионные приборы, Связьиздат, 1954.
10. Булычев А.Л., Лямин П.М., Тулинов Е.С.. Электронные приборы: Учебник. – Мн.: Высш. шк., 1999.
11. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высш. шк., 1991
12. Жеребцов Н.П. Основы электроники. – М. : Энергоатомиздат, 1989
13. Л.Н.Бочаров “Электронные приборы”. «Энергия» 1979г
14. Москатов Е. А., Электронная техника, Таганрог, 2004.
15. М.М.Эфруси Стабилитроны и неоновые лампы МРБ-0289 1958. 66с.
16. Вишневский А. И., Руденко В. С, Платонов А. П. Силовые ионные и полупроводниковые приборы. М., «Высш. школа», 1975. 343 с.

- 17.Протасов Ю.С., Чувашев С.Н. Физическая электроника газоразрядных устройств. М.: Высш. шк.1992. С.352
- 18.Лисицын Б. Л. Элементы индикации. М., «Энергия», 1978. 120 с.
- 19.Кацнельсон Б. В. и др. Электровакуумные электронные и газоразрядные приборы: Справочник М.: Радио и связь, 1985.—864 с.
- 20.Свечников С. В. Газотроны и тиратроны. Киев, изд-во «Техника», 1961.
- 21.Шибает. Н. А. Электровакуумные и полупроводниковые приборы. - М., Воениздат, 1967г.
- 22.Гурлев Д.С. Справочник по ионным приборам. - Киев, Издательство "Техніка", 1970.
- 23.Щука А. А. Электроника. Учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с
- 24.Гершунский Б.С. Основы электроники. Киев, Издательское объединение «Вища школа», 1977, 344 с.
- 25.Федосеева Е. О., Федосеева Г. П. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. — М.: Искусство, 1990.— 240 с.

ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА

ЧАСТИНА II

ЕЛЕКТРОННО–ПРОМЕНЕВІ ТА ПЛАЗМОВІ ПРИЛАДИ

Навчально–методичний посібник

*для студентів спеціальності 6.090804
“Фізична та біомедична електроніка”*

*Швець Євген Якович, к.т.н., професор
Юдачов Андрій Валерійович, ст. викладач
Турба Микола Миколайович, к.ф.м.н., професор*

Підписано до друку 27. 02. 2009р. Формат 60х84 1/32.

Папір офсетний.

Умовн.14.4 Наклад 35 прим.

Замовлення № 22/09 Б

Віддруковано друкарнею

Запорізької державної інженерної академії

3 комп’ютерного оригінал–макету

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226

РВВ ЗДІА, тел. 223 8 240