Міністерство освіти й науки України
Запорізька державна інженерна академія

Юдачов А.В.

ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму

для студентів ЗДІА спеціальності
6.90804 «Фізична й біомедична електроніка»
денної й заочної форм навчання

Запоріжжя
2006

Міністерство освіти та науки України
Запорізька державна інженерна академія

ВАКУУМНА ТА ПЛАЗМОВА ЕЛЕКТРОНІКА

Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму

для ст уденів ЗДІА за спеціальніст ю
6.90804 «Фізична та біомедична електроніка»
денної т а заочної форм навчання

Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ФБМЕ,
протокол № 7 от 10.11.06

Вакуумна та плазмова електроніка. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму для студентів ЗДІА за спеціальністю 6.090804 «Фізична та біомедична електроніка», денної та заочної форм навчання / Укл. Юдачов А.В. - Запоріжжя, 2006 - 102 с

Методичні вказівки, призначені для студентів за спеціальністю «Фізична та біомедична електроніка», для керівництва при виконанні лабораторного практикуму. Вказівки містять теоретичні відомості, вказівки до виконання робот та перелік контрольних запитань.

Укладачі: ***А.В. Юдачов, ст. викладач***

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

ЗМІСТ

ВСТУП 5
Лабораторна робота № 1 ВИВЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК 6
Лабораторна робота №2 ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДІОДА 11
Лабораторна робота № 3 ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРІОДУ 18
Лабораторна робота № 4 ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА 27
Лабораторна робота № 5 ВИВЧЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ Й ХАРАКТЕРИСТИК ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО КАСКАДУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА 34
Лабораторна робота № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБІЛІТРОНА ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДА 41
Лабораторна робота № 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДХИЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОПРОМЕНЕВОЇ ТРУБКИ З ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИМ УПРАВЛІННЯМ 46

ВВЕДЕНИЕ 52
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК 53
Лабораторная работа № 2 ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДИОДА 58
Лабораторная работа № 3 ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРИОДА 65
Лабораторная работа № 4 ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА 74
Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА 82
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА 89
Лабораторная работа № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ 95

ВСТУП

Згідно до вимог освітньо-професійної програми відповідно до напрямку „Комп'ютерні науки" і робочої програми „Вакуумна та плазмова електроніка" студенти напрямку 0908 „Електроніка" спеціальності 6.90804 „Фізична та біомедична електроніка" після вивчення дисципліни **повинні вміти** провести аналіз і розрахунок електричних кіл каскадів, побудованих на електровакуумних приладах та **здобути навички** проведення вимірів електричних параметрів і аналізу функціональних залежностей останніх.

З цією метою студентам пропонуються до самостійного виконання лабораторні роботи, які виконуються на спеціальних стендах в аудиторіях кафедри ФБМЕ.

Завдання до лабораторного практикуму студенти виконують згідно з варіантами, які визначаються відповідно до номеру в академічному журналі обліку успішності і відвідування занять студентами групи.

Студент допускається до виконання чергової роботи практикуму після підтвердження (у вигляді комп'ютерного тестування, або на картах) наявність необхідних знань теоретичного матеріалу і послідовності виконання роботи .

Для заліку виконаної лабораторної роботи студент повинен надати викладачу і захистити індивідуальний звіт з виконаної роботи, обґрунтувавши отриманні результати та побудовані функціональні залежності.

Згідно з модульно-рейтинговою системою організації навчального процесу в робочій учбовій програмі приведено розподіл максимальних балів рейтингу з усіх видів учбової роботи даної дисципліни. Лектор конкретизує (в залежності від запланованої кількості лабораторних робіт, індивідуальних завдань і др.) поділ рейтингових балів поточного семестру про що студентів інформують на початку семестру.

Звіти до лабораторного практикуму виконуються згідно з загальними правилами оформлення науково-технічних звітів і відповідно до вимог Держстандарту і міжнародної системи одиниць СІ. Для написання звітів використовуються аркуші паперу формату А4 , діаграми і графіки розміщують на міліметровому або спеціально розлінованому папері. Зараховані роботи зберігаються на кафедрі протягом навчального року.

Критерії оцінювання виконаних лабораторних робіт.

Згідно з Положеннями про кредитно - модульну систему лабораторна робота вважається такою, що складена, за умови її виконання, написання відповідного звіту та його захисту. Питання з матеріалу лабораторної роботи можуть бути долучені до тестових питань модульного контролю.

Лабораторна робота № 1
ВИВЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ТА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИК

1.1Мета роботи: вивчити принцип дії і принципову схему та органи керування лабораторним стендом, здобуття навичок роботи з електровимірювальними приладами стенду, вивчити основні правила техніки безпеки при проведенні експериментів, а також отримати необхідні знання для виконання наступних робіт.

1.23міст роботи: визначити границю вимірювання, ціну поділки шкали, клас точності, абсолютну похибку вимірювання кожного з вимірювальних пристроїв, що входять до складу стенду. Навчитися керувати джерелами живлення стенду для подальшого досліджування характеристик електровакуумних та іонних приладів

Опис лабораторного стенду

Стенд для проведення лабораторних робіт виконаний у вигляді самостійного блоку, до складу якого належать вбудовані джерела живлення з керованою вхідною напругою, стрілочні вимірювальні пристрої, досліджувані електровакуумні прилади (лампи) і газорозрядні (плазмові) прилади. Принципова електрична схема схема приладу наведена на рисунку 1.1.

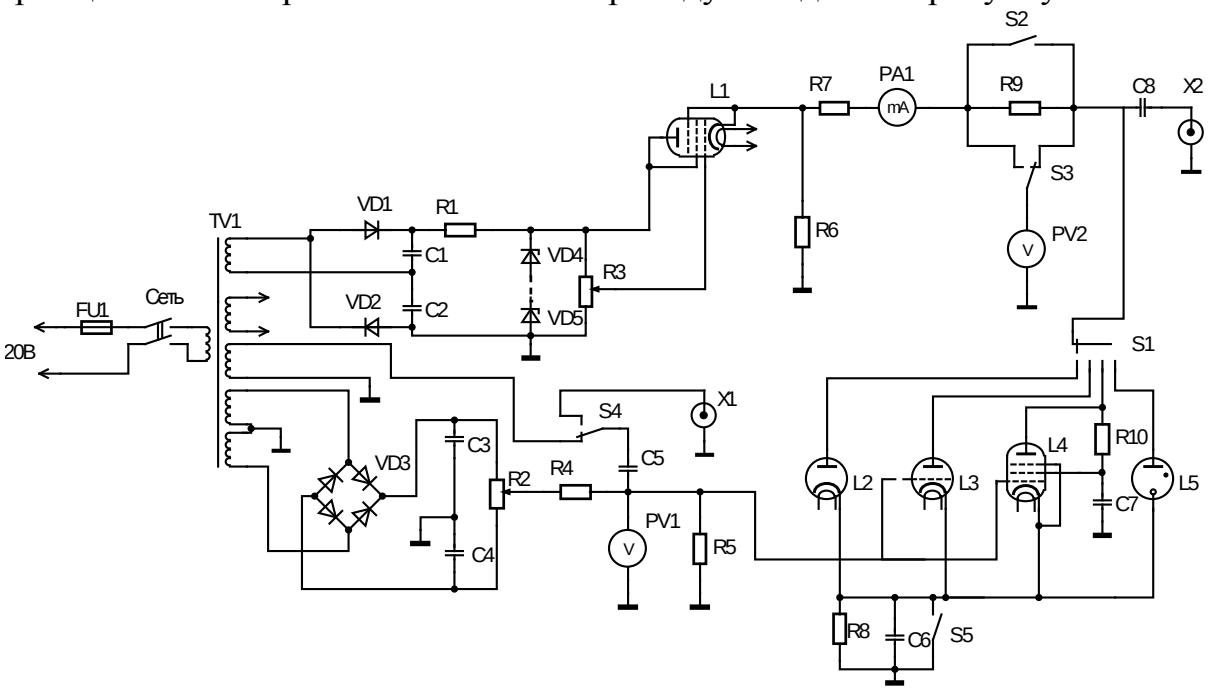


Рисунок 1.1 Принципова електрична схема стенду

До складу стенду входять електровакуумні прилади L1 – L4(L2 – діод, L3 – тріод, L4 – пентод), L5 – стабілітрон тліючого розряду. Анодні кола електровакуумних приладів під'єднуются джерела анодної напруги за допомогою перемикача S1, і таким чином обирається тільки один прилад, характеристики якого досліджуються в лабораторній роботі. Для дослідження анодних характеристик електровакуумних приладів до складу стенду входить джерело змінної анодної напруги. До складу джерела входить випрямляч побудований за схемою подвоєння напруги побудованого на діодах VD1 - VD2, та ємностях C1 - C2. Коло, що складається з резистора R1, та напівпровідникових стабілітронах VD4 - VD5, здійснює стабілізацію рівня вхідної напруги джерела, що живить анодні кола стенду. Резистор R3 і лампа L1 забезпечують регулювання вхідної напруги джерела живлення у межах від 0 до 200. Вольтметр PV2 вимірює вихідну напругу, або напругу на аноді відповідного електровакуумного приладу (в залежності від положення перемикача S3) Для виміру анодного току досліджуваної лампи використовується міліамперметр PA1. Резистори R7,R9 виконують роль анодного навантаження.

Для дослідження анодно-сіткових характеристик електровакуумних приладів до складу стенду входить джерело регульованої сіткової напруги. Джерело сіткової напруги складається з випрямляча, побудованого за мостовою схемою з середньою точкою на діодному мості VD3, конденсаторів C3 та C4. Завдяки цьому на виході випрямляча, при обертанні ручки потенціометра R2, може бути встановлена як позитивна так і негативна сіткова напруга. Для виміру напруги на керуючій сітці досліджуваних ламп використовується вольтметр PV1, який має „0" в середині шкали. Резистор R5 забезпечує нормальний режим сіткових кіл досліджуваних приладів.

Резистор R8 і конденсатор C6 утворює коло автоматичного зсуву для досліджуваних тріода та пентода, а перемикач S5 дозволяє проводити його відключення.

Резистор R10 та конденсатор C7 утворюють коло живлення екранної сітки досліджуваного пентоду.

На передній панелі стенду встановленні два коаксіальних роз'єднувача X1 та X2. Через роз'єднувач X1 подаються вхідні сигнали в сіткові кола досліджуваних ламп. З роз'єднувача X2 знімають сигнали анодного кола досліджуваної лампи.

1.3 Порядок виконання роботи.

1.Ознайомитись з органами керування стендом та призначенням вимірювальних приладів на передній панелі стенду.

2.Ознайомитись з границями вимірювання, класом точності, кількістю поділок на шкалі кожного приладу. Дані приладів занести в таблицю 1.1.

Для розрахунку даних потрібно використовувати розрахункові формули ціни поділок ділення вимірювального приладу яка визначається за формулою:

$$Ц_{дел} = \frac{П_{изм}}{n} \qquad (1.1)$$

де $П_{изм}$ – границя виміру приладу, n – кількість ділень на шкалі

класу точності (приведеної похибки):

$$\delta = \frac{\Delta A}{П_{изм}} \qquad (1.2)$$

де ΔА – абсолютна похибка вимірювального приладу яка визначається за формулою

$$\Delta A = A_{вим} - A_{дій} \qquad (1.3)$$

де $A_{вим}$– виміряна величина $A_{дій}$ – дійсне значення виміряної величини.

Таблиця 1.1 – Параметри та характеристики вимірювальних приладів стенду.

Найменування вимірювального приладу	Межа виміру, В(мА)	Клас точності приладу, %	Ціна розподілу вимірювального приладу, В(мА)	Абсолютна погрішність вимірювального приладу, В(мА)
Вольтметр, що вимірює анодну напругу				
Вольтметр, що вимірює сіткову напругу				
Мілліамперметр, що вимірює анодний струм				

3.Встановити регулятор анодної напруги (резистор R3) в крайнє ліве положення. Встановити регулятор сіткової напруги (резистор R2) у крайнє ліве положення. Усі клавіші перемикача S1 повинні бути вимкнені. Встановити перемикач S5 у нижнє положення. Перемикачі S4, S2, S3 можуть знаходитись у довільному положенні. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

4.Переводячи ручку регулятора анодної напруги з крайнього лівого положення в крайнє праве положення виміряти діапазон регулювання вимірів анодної напруги. Результати вимірів занести в таблицю 1.2 встановити регулятор анодної напруги (резистор R3)у крайнє ліве положення.

5.Аналогічні дії провести для виміру діапазону вимірів сіткових напруг. Результати вимірів занести в таблицю 1.2 Встановити регулятор сіткових напруг (резистор R2) у крайнє ліве положення.

При проведенні вимірів не допускати зашкалювання (перевищення границі виміру) стрілок вимірювальних приладів для запобігання їх псування.

6. Виміряти величину опору навантаження анодного кола електровакуумних приладів. Для цього встановити величину анодної напруги E_a=150 В та величину сіткової напруги E_c=50 В, встановити перемикач S3 в нижнє положення (вимір анодної напруги), встановити перемикач S2 в нижнє положення і натиснути другу клавішу перемикача S1 провести відлік значень величин анодної напруги та струму. Розрахувати величину опору анодного навантаження.

$$R_A = \frac{E_A - U_A}{I_A} \tag{1.4}$$

Перевести перемикач S2 у верхнє (замкнуте) положення та повторити виміри та розрахунки. Результати вимірів занести в таблицю 1.2

Таблиця 1.2 Числові характеристики джерел анодної та сіткової напруги.

Найменування вимірюваних параметрів	Межа виміру приладу, В	Мінімальне значення параметра, В	Максимальне значення параметра, В
Анодна напруга			
Сіткова напруга			
Опір навантаження анодного ланцюга	-		

Забороняється залишати стенд в режимах великих анодних струмів та позитивних сіткових напруг на термін більший за 30 сек.

7.Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруг анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

В зв’язку з тим що у стенді використовуються високі напруги небезпечні для життя людини, **студентам забороняється самостійно проводити ремонтні роботи лабораторного стенду у випадку його несправності. У подібних випадках всі питання, пов’язані з несправністю лабораторного обладнання вирішують викладачі, які проводять лабораторний практикум.**

1.4 У звіті відображається:

- тема та ціль роботи;
- принципова схема приладу;
- результати вимірів напруги живлення анодного та сіткового кола електровакуумних приладів;
- результати розрахунків параметрів вимірювальних приладів;
- висновки за роботою.

1.5 Контрольні запитання.

1.Які джерела навантаження знаходиться в стенді, і які кола вони живлять?

2. Який діапазон зміни напруг живлячих сіткові кола електровакуумних приладів.

3. Який діапазон напруг живлячих анодні кола електровакуумних приладів.

4.Яка похибка визначає клас точності приладу?

5.Яким чином визначити абсолютну похибку виміру, знаючи клас точності приладу?

6.В яких межах можна змінювати опір навантаження анодного кола?

Лабораторна робота №2

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДІОДА

1.1 **Мета роботи:** вивчити принцип дії та явища струмопереносу у електровакуумному діоді, вплив простінкового заряду на характеристики діода.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для побудови вольтамперних характеристик електровакуумного діода при різних напругах накалу катода.

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Вакуумний діод є найпростішим електроним приладом, та звичайно являє собою коаксіальні циліндричні електроди: Катод и анод, що нагрівається, розташовують у вакуумній колбі. Катод, при нагріванні, імітує електрони, які рухаються до аноду при поданні на нього доданої напруги, таким чином, виникає анодний струм *Ia*. Емітовані катодом електрони рухаються у вакуумному проміжку, де, на відміну від інших середовищ, вони не зіштовхуються з важкими часточками, тобто відсутні сили тертя, які заважають вільному руху електронів.

Однак, як показує досвід, якщо до аноду прикласти позитивну напругу *Ua* , то анодний струм *I* не збільшиться ривком до максимального значення *Im*, а плавно зросте від нуля до *Im* . Після цього це зростання струму закінчиться, тобто на вольт амперній характеристиці (ВАХ) діоду *Ia=f(Ua)* прослідковуються ділянки зростання та насищення. Струми на цих ділянках визначаються різними фізичними явищами, які вивчаються у даній лабораторній роботі.

Роздивимось для початку зростаючу частину ВАХ. Для спрощення будемо вважати електроди плоскими та достатньо великими, щоб можна було знехтувати крайовими ефектами. Тоді, за відсутністю струму, тобто зарядів у між електродному проміжку, потенціал φ зростає лінійно від катоду до аноду (пряма 1 на рисунку 2.1).

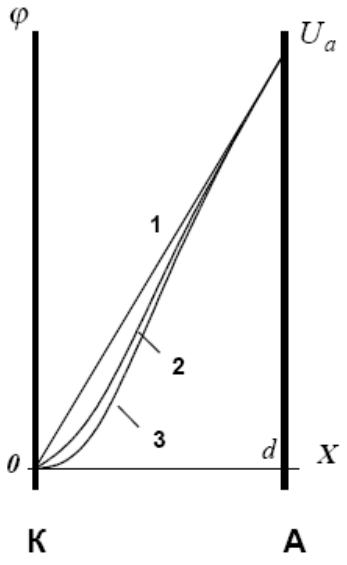


Рисунок 2.1

Внаслідок термоемісії електрони з поверхні катода проходить в міжелектродний проміжок, де виникає об'ємний заряд електронів густиною **ρ**.

Згідно рівняння Пуасона

$$-\nabla^2\varphi = -\rho/\varepsilon_0, \tag{2.1}$$

(ε_0 – електрична постійна) цей заряд створює розподіл потенціалу, який скривлює початкове розподілення за відсутність струму (крива 2 на малюнку 2.1). Зі збільшенням струму емісії зростає об'ємний заряд, та поле викривлюється сильніше (крива 3 на малюнку 2.1). Таким чином, емітовані катодом, електрони рухаються у сумарному електричному полі, який задається електродами та власним об'ємним зарядом електронів. Воно описується рівнянням (2.1) та обмежує величину струму, який протікає через діод.

Нехтуючи тепловим розкидом швидкостей електронів які вийшли з катоду, тобто, всі електрони рухаються з однаковою швидкістю U від катода до аноду, можна зробити висновок, що розподіл поля та заряду не змінюється з часом ($d\boldsymbol{\rho}/dt$=0), тому, за рівнянням неперервності

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\boldsymbol{j} = 0, \tag{2.2}$$

тобто $j = enu = \boldsymbol{\rho}u = const.$

Оскільки електрони весь час рухаються у полі яке їх прискорює, їх швидкість зростає, а густина, внаслідок збереження j – падає. Значить, поле електродів спотворюється, здебільше, близько до катода, де поле об'ємного заряду є більш впливовим, причому зі збільшенням потенціалу аноду, область впливу заряду зменшується, а струм збільшується. Розподіл потенціалу у міжелектродному проміжку згідно рівнянню (2.1):

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{j}{u\varepsilon_0} = \frac{j}{(2e\varphi/m)^{1/2}\varepsilon_0} = Aj\varphi^{-1/2}, \tag{2.3}$$

де постійна $\boldsymbol{A}$ має значення $A = (2e/m)^{-1/2}\varepsilon_0^{-1}$.

Граничні умови для рівняння для рівняння (2.2) мають вид:

$$\varphi(x=0) = 0, \qquad \frac{d\varphi}{dx}(x=0) = 0 \tag{2.4}$$

Перша гранична умова – очевидна, друга - знаходиться за тієї умови, що при знехтуванні тепловим розкидом швидкостей емітованих катодом

електронів, при $\frac{d\varphi}{dx}(x=0)>0$ вони всі проникають на анод незалежно від $U\ a$, а при $\frac{d\varphi}{dx}(x=0)<0$ всі повертаються на катод гальмуючим полем знову ж таки незалежно від $U\ a$. Ці результати входять у протиріччя з досвідом, тому залишається припустити вид (2.3) граничних умов завдання. В реальних приладах друга гранична умова (2.3) виконується при $x \le 0{,}1$мм. Двічі інтегруючи рівняння (2.3) отримуємо

$$j=\frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{\varphi^{3/2}}{x^2}. \tag{2.5}$$

Якщо відстань між електродами рівне d, а напруга - Ua , то формула (2.4) матиме вигляд

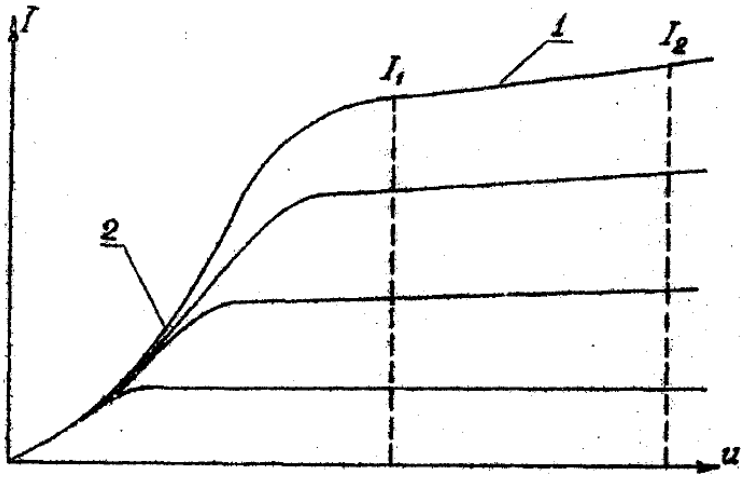
$$j=\frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{U^{3/2}}{d^2}\ . \tag{2.6}$$

Вираз (2.6) носить назву закону Ленгмюра (закон «трьох других») та зв’язує густину струму та анодну напругу діода при заданій відстані між електродами d.

Для діода з коаксіальними електродами, якщо радіус анода набагато більше радіуса катода залежність струму I від напруги U описується за допомогою виразу

$$I=\frac{2\sqrt{2}}{9}\sqrt{\frac{e}{m}}\frac{l}{ra}U^{3/2} \tag{2.7}$$

Графік залежності анодного струму від напруги на аноді діода представлений на рисунку 2.2.



1 – ефект Шотки, 2 – «закон 3/2»

Рисунок 2.2 – Вольтамперні характеристики електровакуумного діода при різних температурах катода

При проведенні досліду прослідковується відхилення від закону Ленгмюра, як при низьких, так і при високих значеннях *Ua* . У першому випадку вони зв'язані з впливом початкових теплових значень електронів, а також за наявністю потенціалу, розподіленого вздовж катоду, внаслідок прикладеної до його кінців напруги накалу. У другому випадку відхилення від закону Ленгмюра зв'язані з переходом до ділянки насичення ВАХ. Таким чином, струм насичення на зростаючій частині ВАХ діода знаходиться за дією об'ємного заряду електронів, та заздалегідь меншого струму термоелектронної емісії катода.

При достатньо високих анодних напругах анодний струм доходить до насичення– всі емітовані електрони проникають на анод.

Якщо анодна напруга доходить до значення насичення $Ua_{нас}$, анодний струм дорівнюватиме емісійному струму, та залежить тільки від температури та площі катода ця залежність описується формулою Ричардсона - Дэшмана

$$j = AT^2 \exp(-\varphi / kT) . \qquad (2.8)$$

де j – густина струму емісії (відношення струму емісії до площі катода), Т – температура катода, φ – робота виходу електрона, k – постійна Больцмана.

В режимі насичення анодний струм не залишається постійним, та зростає зі збільшенням анодного струму. Це виникає внаслідок ефекту Шотки - вплив зовнішнього електричного поля на роботу виходу електрона .За наявністю зовнішнього електричного поля потенційний бар'єр на межі метал-вакуум стає кінцевим, а його величина дещо знижується. Зниження висоти потенційного бар'єра, тобто зниження роботи виходу електронів це відношення $\Delta\varphi=e^{3/2}E^{1/2}$, де Е – напруженість електричного поля поблизу катода. Напруженість поля Е розраховується за формулою

$$E = \frac{U}{r_K} \ln(r_a / r_K) \qquad (2.9)$$

де r_a – радіус анода, $r_к$ – радіус катода.

Режим насичення відповідає максимальному значенню анодного струму, при заданій температурі катода. Знаючи електричні параметри ланцюга накалу можливо розрахувати ефективність катода діода

$$H = \frac{I_{к\,max}}{I_н U_н}. \tag{2.10}$$

При роботі діодів в ланцюгах постійного струму цікавим є такий параметр діода як опір його постійного струму

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a}. \tag{2.11}$$

При роботі діодів в ланцюгах постійного струму також використовується такий параметр як диференційний опір Ri

$$Ri = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \tag{2.12}$$

З формул чітко видно, що опори R_0 и Ri суттєво відрізняються на початковому відрізку та на відрізку насичення.

Диференційний опір діод зв'язаний з крутизною вольт-амперної характеристики наступним відношенням

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{1}{Ri} \tag{2.13}$$

1.4 **Порядок виконання роботи:**

1. Підготувати до роботи лабораторний стенд. Встановити регулювачі анодного та сіткового у крайнє ліве положення. Пересвідчитися (не вмикаючи стенд) що стрілка міліамперметра, який вимірює анодні струми електровакуумних приладів знаходиться точно на на відмітці «0». Встановити перемикачі S2 та S5 у нижнє положення. Положення перемикача S3 та S4 не має значення. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

2. Натиснути ліву клавішу перемикача S1 на передній панелі стенда, що дає можливість дослідити електровакуумний діод.

3. До зовнішнього джерела живлення підключити ланцюг накалу досліджуваного діода. Встановити напругу накалу 2,0В. дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин.

4. Змінюючи напругу на аноді діода від 0В до 100В через 10В, та фіксуючи при цьому величину анодного струму, зняти вольт-амперну характеристику (ВАХ) діода. Результати вимірювань занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювання вимірювання ВАХ діода

№ п/п	Анодна напруга, В	Анодний струм, мА	Напруга нак., В	Струм нак., мА	Крутизна ВАХ, мА/В	Опір пост. струму, кОм	Дифф-й опір, кОм	Ефективність катода, мА/Вт
1	0		3					
….	….		3					
100	100		3					
1	0		4					
….	….		4					
100	100		4					
1	0		5					
….	….		5					
100	100		5					

Після закінчення вимірювань встановити регулятор анодної напруги у крайнє ліве положення.

5. Встанови напругу накалу 2,5В. Дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин. Повторити дії вказані у п.4.

6. Встановити напругу накалу 3,0В. Дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин. Повторити дії вказані у п.4.

7.Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруги анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

8. Побудувати групу вольтамперних характеристик для всіх напруг накалу катода.

9. На окремому графіку побудувати початкову нелінійну ділянку ВАХ у координатах $I(U_a^{3/2})$

10. За результатами вимірювань розрахувати наступні характеристики електровакуумного діода: внутрішній опір діода постійного струму, диференційний опір, крутизну вольт-амперної характеристики, ефективність катода.

1.5 У звіту відображається:

- тема та мета робота ;
- результати вимірювання анодних струмів та напруг, а також напруг та струмів ланцюга накалу електровакуумних приладів;
- результати розрахунку параметрів електровакуумного діода;
- графіки вольт-амперних характеристик діода за різними напругами накалу діода;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні запитання

1. Поняття вакуумна та електровакуумних приладів.
2. Які фізичні процеси виникають при термоелектронній емісії?
3. Фізичне поняття роботи виходу електрона.
4. Класифікація катодів.
5. Параметри катода та від чого залежить ефективність катода.
6. Що таке затримуючий потенціал?
7. Як залежить струм від термоемісії затримуючого потенціалу?
8. Що таке поле об'ємного заряду?
9. Фізичне значення ефекту Шотки.
10. Що описує закон Ленгмюра (закон степені 3/2)?
11. Від яких параметрів електровакуумного діода залежить крутизна його ВАХ?
12. Від яких параметрів електровакуумного діода залежить внутрішній постійного струму?

Лабораторна робота № 3

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРІОДУ

1.1 Ціль роботи: вивчити принцип дії й характеристики в електровакуумного тріоду.

1.2 Зміст роботи: зробити необхідні виміри для побудови сімейства вольтамперних характеристик електровакуумного тріода при різних напругах на його аноді та керуючій сітці.

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Тріод - це електронно-керована лампа, що містить три електроди: катод, анод і між ними третій електрод, який називається сіткою.

Процес виходу електронів з тіла називають електронною емісією. Для того, щоб електрон вийшов з тіла йому необхідно повідомити додаткову енергію. Залежно від виду додаткової енергії розрізняють термоелектронну, вторинну електронну емісію й ін. У лампах найбільше поширення одержала термоелектронна емісія.

Катод – це електрод, що при нагріванні випускає електрони. По конструктивній ознаці катоди можна розділити на дві групи: катоди прямого розжарення й непрямого. У першому випадку струм розжарення *Iн* протікає безпосередньо по тілу катода. У катодах непрямого розжарення підігрівник і катод розділяються ізолятором, що має добру теплопровідність. Перевага катодів непрямого розжарення перед катодами прямого розжарення полягає в можливості їхнього живлення змінним струмом. Це значно спрощує схеми джерел напруги розжарення.

Анод – є колектором, тобто електродом, що збирає електрони. Анод відповідно до форми катода виконується або у вигляді циліндра, або у вигляді короба.

Сітка - дозволяє здійснювати керування анодним струмом тріода, тому її називають керуючою сіткою. Вона виконується у вигляді спирали з тонкого дроту, розташовується між катодом й анодом, ближче до поверхні катода.

Принцип дії тріода.

Потенціал катода приймають рівним нулю(*U*к=0), на анод подається позитивна напруга, а на сітку лампи може бути подане як позитивна, так і негативна напруга. При нагріванні катода струмом розжарення *Iн* виникає термоелектронна емісія. Електрони скупчуються в катода у вигляді електронної хмари, й під впливом позитивної напруги анода спрямовуються до нього. При цьому з'являється анодний струм *I*а, спрямований у зовнішньому ланцюзі від катода до анода. Слід зазначити, що на електрони які емітували з катоду лампи, що перебувають у вакуумному об'ємі, діє сукупність сил електричних полів, які утворяться прикладеними напругами до електродів лампи (сітці й аноду). Таким чином, на електрон у тріоді діють сили двох полів - позитивного (прискорювального, або що притягає) поля анода й поля сітки, що може бути як прискорювальним - при позитивній напрузі на ній, так і гальмуючої при негативній напрузі.

Сила, з якої поле діє на електрон, визначається по формулі

$$F = - e E = -e/d \qquad (3.1)$$

де e – заряд електрона рівний $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а E = U/d– напруженість поля, що залежить від величини напруги й відстані між електродами.

Оскільки сітка лампи розташовується до катода на багато ближче ніж анод, отже вплив її поля на термоелектрони на багато значніше ніж поля анода. З цього виходить, що незначні зміни напруги на сітці тріода приводять до значних змін струму анодного ланцюга.

Зміна напруги на сітці сильно впливає на електричне поле в просторі катод-сітка й слабкіше на поле між сіткою й анодом.

Розглянемо вплив сітки на роботу тріода.

1) Uc <= 0; Ia1 > 0; Ic = 0 (рисунок 3.1)

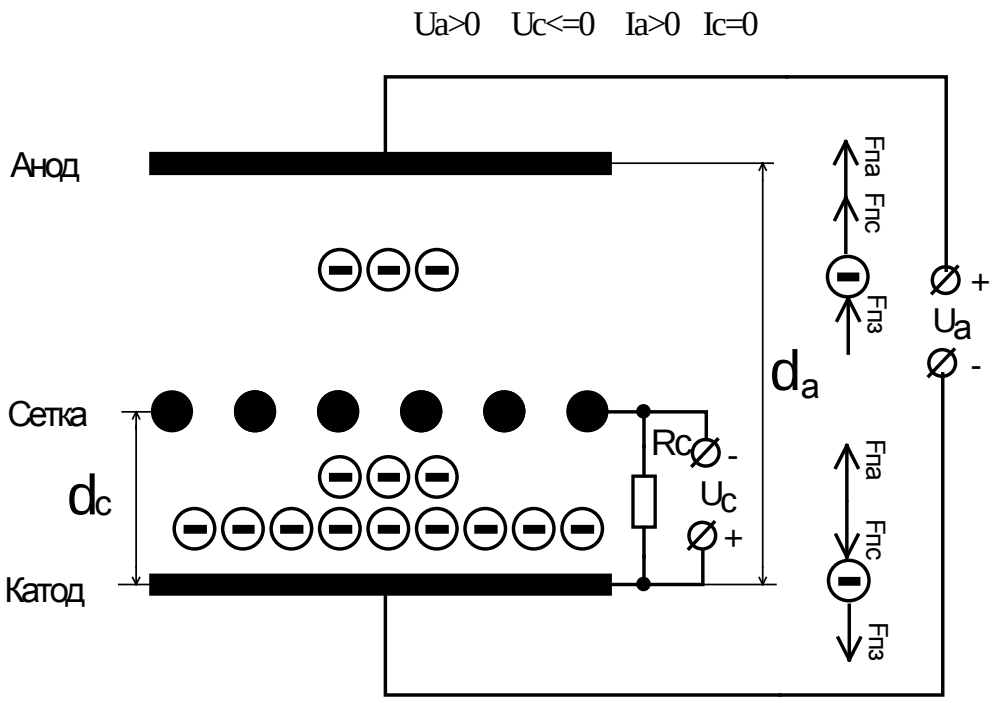


Рисунок 3.1

Отже, при напрузі на сітці, рівному нулю, сітка не робить впливи на поле анода, і в ланцюзі анода буде протікати струм.

2) Uc > 0; Ia2 > Ia1; Ic > 0. (рисунок 3.2)

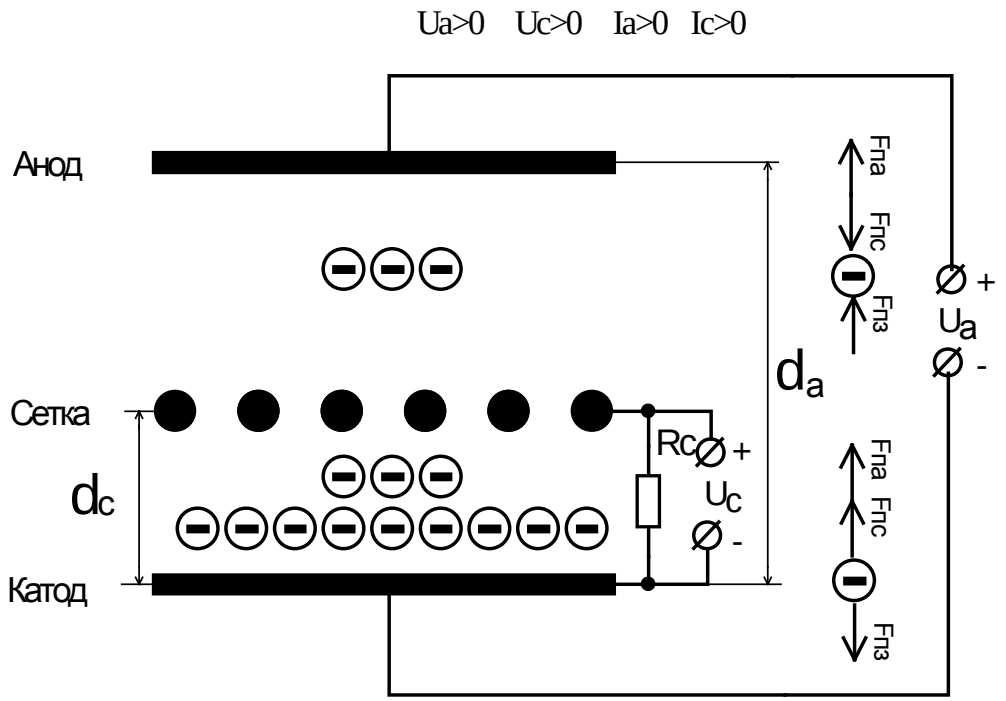


Рисунок 3.2

При позитивних напругах на сітці між нею й катодом виникає поле сітки, лінії, напруженості якого спрямовані так само, як й в анода. Результуюча дія поля на електрони підсилюється, і струм анода зростає. Отже, позитивно заряджена сітка перехоплює частину електронів, за рахунок чого виникає струм сітки Ic.

3) Uc << 0; Ia3=0. (рисунок 3.3)

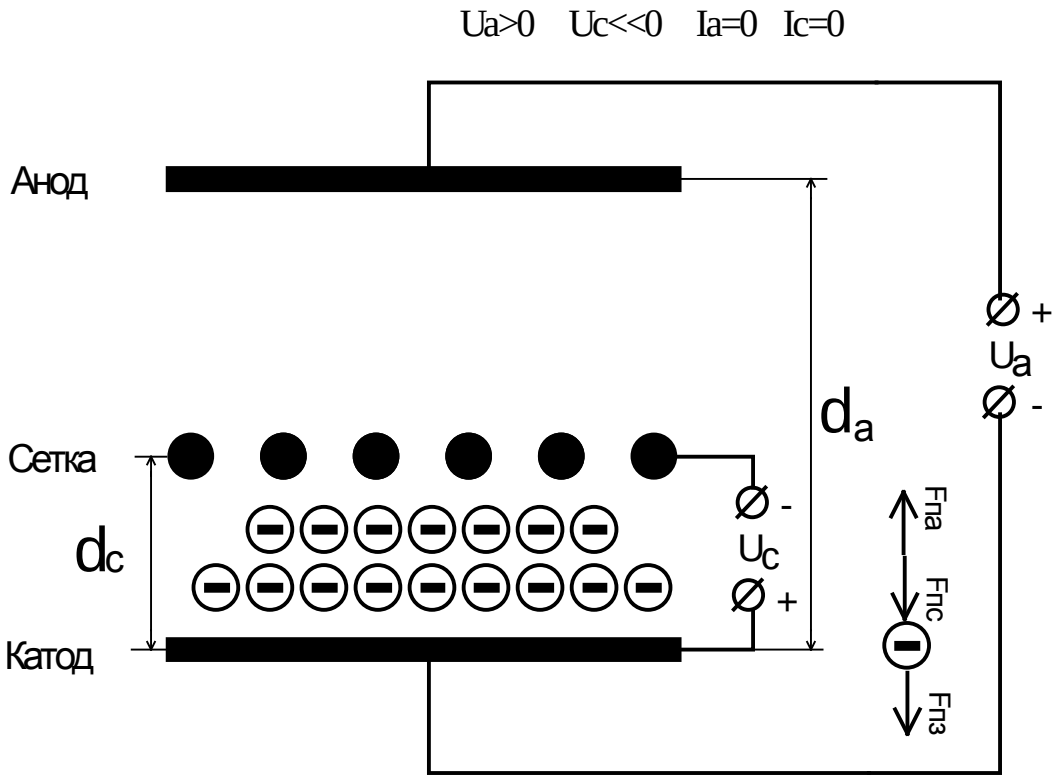


Рисунок 3.3

При подачі негативної напруги на сітку - поле сітки буде протидіяти полю анода, за рахунок чого, анодний струм зменшується.

При досить великій негативній напрузі на сітці в просторі катод – сітка, гальмуюче поле створюється не тільки поблизу витків сітки, але й між ними. Тому електрони, що залишають катод не можуть перебороти дію гальмуючого поля й повертаються до катода. У результаті об'ємний негативний заряд і потенціал у просторі між катодом і сіткою стає ще більш негативним. Електрони не досягають анода, і анодний струм *I*а=0. Напруга керуючої сітки, при якому *I*а=0 називається напругою запирання лампи *Uзап*, або напругою відсічення *Uвідс*. Зменшення негативної напруги на сітці приводить до зменшення гальмуючого поля й тоді все більше число електронів здатні досягти анода. При подачі позитивної напруги більша частина електронів спрямовується до анода й створює анодний струм, але електрони, що рухаються поблизу витків сітки, притягаються до неї й утворять сітковий струм *I*с. У такий спосіб при *U*с>0 потік електронів, що рухаються від катода й утворюючий катодний струм *I*к, поділяються на два потоки, що створюють сітковий й анодний струми.

$$I_к = I_с + I_а \qquad (3.2)$$

Тому що площа витків набагато менше площі анода, то *I*с << *I*а.

Тріод має два сімейства вольтамперних характеристик:

Анодні (вихідні) - залежність сили струму в анодному ланцюзі тріода від величини напруги на аноді при постійній напрузі на сітці лампи.

Анодно-сіткові (прохідні) - залежність сили струму в анодному ланцюзі тріода від величини напруги на сітці лампи при постійній напрузі на аноді тріода.

На рисунку. 3.4 наведені анодно-сіткові характеристики $I_A = f(U_C)$ для тріода.

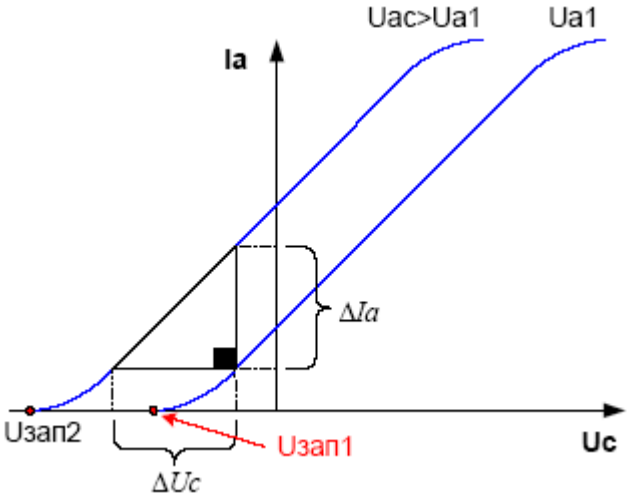


Рисунок 3.4

На рисунку 3.5 наведені анодні характеристики $I_A = f(U_A)$ для тріода.

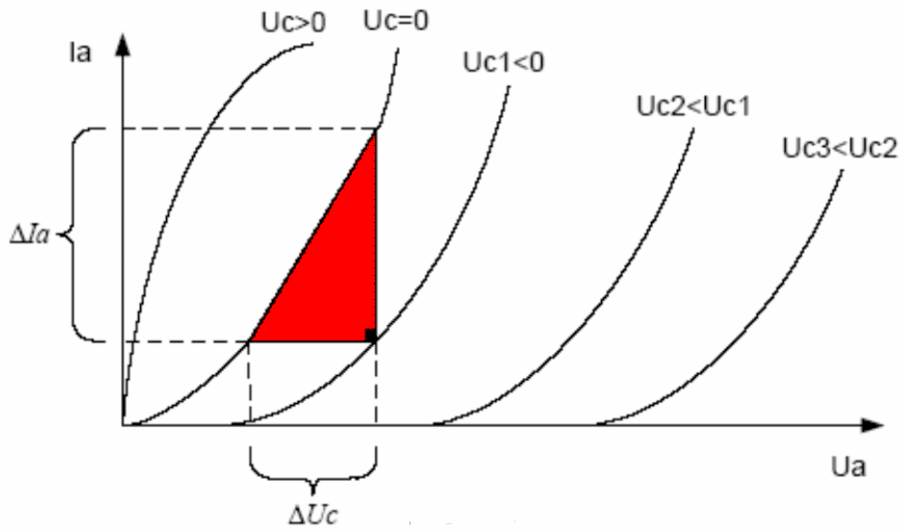


Рисунок 3.5

Для оцінки якості лампи використаються статичні параметри лампи. Статичні параметри відбивають залежність, звичайно в одній (робочої) крапці, при заданому режимі роботи лампи.

Основні статичні параметри тріода:

крутизна прохідної характеристики

$$S = \frac{dI_a}{dU_{C1}}\Bigg|U_a = const \tag{3.3}$$

внутрішній опір лампи по змінному струмі (диференціальний опір)

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}\Bigg|U_{C1} = const \tag{3.4}$$

опір лампи постійному струму

$$R_0 = Ua / Ia \tag{3.5}$$

коефіцієнт підсилення

$$\mu = \Delta U_A / \Delta U_C \tag{3.6}$$

проникність тріода

$$Д = 1/\mu = \Delta U_C / \Delta U_A \tag{3.7}$$

Добуток *SRi* = μ називається внутрішнім рівнянням тріода.

У тріоді є три міжелектродні ємності (рисунок 3.6) *Сск* – створює реактивну провідність у вхідному ланцюзі – називають вхідною ємністю, *Сак* – створює реактивну провідність у вихідному ланцюзі – вихідною ємністю,

ємність анод-сітка *С*са створює зв'язок між вхідними й вихідними ланцюгами лампи – тому неї називають прохідною ємністю.

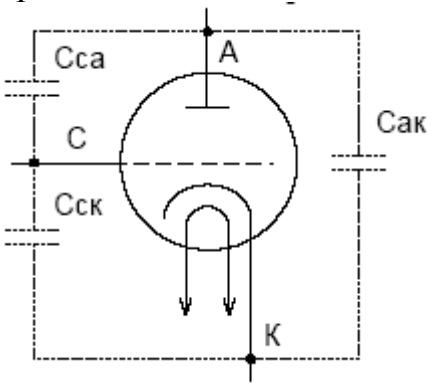


Рисунок 3.6 – Міжелектродні ємності в тріоді

Прохідна ємність робить найбільш сильний вплив на властивості тріода на високих частотах. Через неї протікає струм з вихідного ланцюга у вхідну, тобто має місце зворотний зв'язок (ОС). Зі збільшенням частоти опір ємності *С*ас стає малим й у результаті проходження високочастотного сигналу ламповий підсилювач може перетворитися в генератор незатухаючих коливань (режим самозбудження).

1.4 **Порядок виконання роботи:**

1. Підготувати до роботи лабораторний стенд. Установити регулятори анодної й сіткової напруг у вкрай ліве положення. Пересвідчитися (не вмикаючи стенд) що стрілка міліамперметру, який вимірює анодні струми електровакуумних приладів перебуває точно на оцінці «0». Установити перемикачі S2 у верхнє положення, а перемикач S5 у нижнє положення. Перемикач S3 установити в нижнє положення. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

2. Нажати другу зліва клавішу перемикача S1 на передній панелі стенда, що дасть можливість досліджувати електровакуумний тріод.

3. Дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин. Установити напруга на сітці тріода -6В.

4. Змінюючи напругу на аноді тріода від 0 В до 100 В (через 10 В), і фіксуючи при цьому величину анодного струму, зняти анодну (вихідну) вольтамперну характеристику (ВАХ) тріода. **Увага !!! ВЕЛИЧИНА анодного струму не повинна перевищувати межі виміру мілліамперметру.** Результати вимірів занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати виміру анодної (вихідний) ВАХ тріода

№п/п	Напруга сітки, В	Анодна напруга Ua, В	Анодний струм Ia, мА	Опір постійному струму тріода Ro, кОм	Диференційний опір тріода Ri, кОм
1	+1	0			
…...	+1	…...			
10	+1	100			
1	-3	0			
…...	-3	…...			
10	-3	100			
1	-6	0			
…...	-6	…...			
10	-6	100			

Після закінчення вимірів установити регулятор анодної напруги в крайнє ліве положення.

5. Установити напругу сітки -3В. Повторити дії зазначені в п4.

6. Установити напругу сітки +1В. Повторити дії зазначені в п4.

6. Побудувати сімейство вольтамперних характеристик для всіх сіткових напруг тріода.

7. Установити напругу на сітці тріода (-8 В), і напругу на аноді 50 В.

8. Змінюючи напругу на сітці тріода від (-8В) до (+1 В) через 1В, і фіксуючи при цьому величину анодного струму, зняти анодно-сіткову (прохідну) вольтамперну характеристику (ВАХ) тріода. Результати вимірів занести в таблицю 3.2. Аналогічні дії зробити при величинах анодної напруги 100В и 150В.

Таблиця 3.2 – Результати виміру анодно-сіткової (прохідний) ВАХ тріода

№п/п	Анодна напруга Ua, В	Напруга сітки Uc, В	Анодний струм Ia, мА	Опір постійному струму тріода Ro, кОм	Крутість ВАХ S, мА/В	Диференціїний опір тріода Ri, кОм
1	+50	-8				
…...	+50	…...				
10	+50	+1				
1	+100	-8				
…...	+100	…...				
10	+100	+1				
1	+150	-8				
…...	+150	…...				
10	+150	+1				

По результатам виміров побудувати анодно-сіткові (прохідні) ВАХ тріода

9. Віджати всі клавіші перемикача S1 і встановити величину напруги живлення анодного ланцюга тріода Ea=150В. Натиснути другу клавішу перемикача S1 (рахунок ведеться зліва на право) на передній панелі стенду. Встановити напругу на сітці тріода -2В, і провести відлік напруги на аноді електровакуумного тріода. Результати вимірювання занести в таблицю 3.3. Встановити напругу на сітці тріода +1В, і провести відлік напруга на аноді електровакуумного тріода. Результати вимірювання занести в таблицю 3.3.
10. Перевести перемикач S2 у нижнє положення. Встановити напругу на сітці тріода -2В, і провести відлік напруги на аноді електровакуумного тріода. Результати вимірювання занести в таблицю 3.3. Встановити напругу на сітці тріода +1В, і провести відлік напруга на аноді електровакуумного тріода. Результати вимірювання занести в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання коефіцієнта посилення тріода

№п/п	Анодна напруга Ua, В	Напруга на сітці Uc, В	Анодний струм Ia, мА	Опір навантаження тріода Rн, кОм	Коефіцієнт підсилення μ	Положення перемикача S2
1		-2				Вверх
2		+1				
3		-2				Вниз
4		+1				

11. Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруг анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

12. За результатами вимірів розрахувати наступні характеристики електровакуумного тріоду: внутрішній опір діода постійному струму, диференціальний опір, крутизну вольт-амперної характеристики, проникність та підсиленя тріода, напруга відсічення.

1.5 У звіті відобразити:

- тему й ціль роботи;
- результати виміру анодних струмів і напруг;
- результати розрахунків параметрів електровакуумного тріода;
- графіки сімейств вольтамперних (анодних й анодно-сіткових) характеристик тріода;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. Які поля, яких електродів діють на електронний потік у тріоді?
2. Яке призначення керуючої сітки в тріоді?
3. Причина сильного впливу сіткової напруги на силу анодного струму.
3. Статичні характеристики тріода.
5. Яка залежність статичних параметрів від положення робочої точки? Визначення їх по характеристиках.
6. Яка з міжелектродних ємностей тріода сильніше всього впливає на роботу тріода в області високих частот?
7. Що таке напруга відсічення тріода?
8. Як змінюється величина напруги відсічення при зміні анодної напруги тріода?
9. Які недоліки тріодів?
10. Класифікація тріодів.

Лабораторна робота № 4

ВИВЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА

1.1 Мета роботи: вивчити принцип дії та характеристики в електровакуумному пентоді.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для побудови груп вольт-амперних характеристик електровакуумного пентода при різних напругах на його управляючій сітці.

1.3 Короткі теоретичні дані:

Пентод – це електронно-управляюча лампа, яка містить п’ять електродів: катод, анод та між ними три електрода, які називаються сітками.

Процес виходу електронів з тіла називають електронною емісією. Цей процес описаний у теоретичних даних попередніх робіт.

Призначення катода та анода пентода також описані в теоретичних даних попередніх робіт.

Сітки у пентоді дозволяють реалізувати управління анодним струмом пентода, та зменшують його прохідну ємність. Вони виконуються у вигляді спіралі з тонкої проволоки, розташовується між катодом і анодом.

Принцип дії пентода.

Потенціал катода звичайно прирівнюють до нуля(Uк=0), на анод подається додана напруга, а на управляючу(першу) сітку лампи може бути подана як позитивна так і негативна напруга. Для зменшення прохідної ємності лампи (Сса) у склад пентода введені дві додаткові сітки – екранна та захисна. Екранна сітка за своєю конструкцією схожа на управляючу сітку на тріоді, але вона має менший крок спіралі. На екранну сітку подається позитивна напруга, значення якої звичайно рівне 60-100% величини анодної напруги. Тому що у цій лампі, позитивний потенціал має не тільки анод, а також і екранна сітка, тоді на електронний потік, що рухається від катода до анода, впливає на поля трьох електродів. В результаті чого струм катода завжди розвітвлюється на два потоки: потік електронів, що направляються до анода, та потік електронів, які попадають на екранну сітку. Так як управляюча сітка ламп, як правило працює в області негативних напруг

$$I\text{к} = I\text{с}_2 + I\text{а} \qquad (4.1)$$

Так як площа витків екранної сіткі набагато менша площі анода, то $I\text{с}_2 << I\text{а}$. Пентод, також як і тріод, має два сімейства вольт-амперних характеристик: Анодні (вихідні) - залежність сили струму у анодному ланцюгу тріода від напруги на аноді при постійній напрузі на сітках лампи. Анодно-сіткові (прохідні)- залежність сили струму у анодному ланцюгові тріода від напруги на сітці лампи при постійній напрузі на аноді, та екранної сітки пентода.

На рисунку.4.1. приведена анодна характеристика пентода

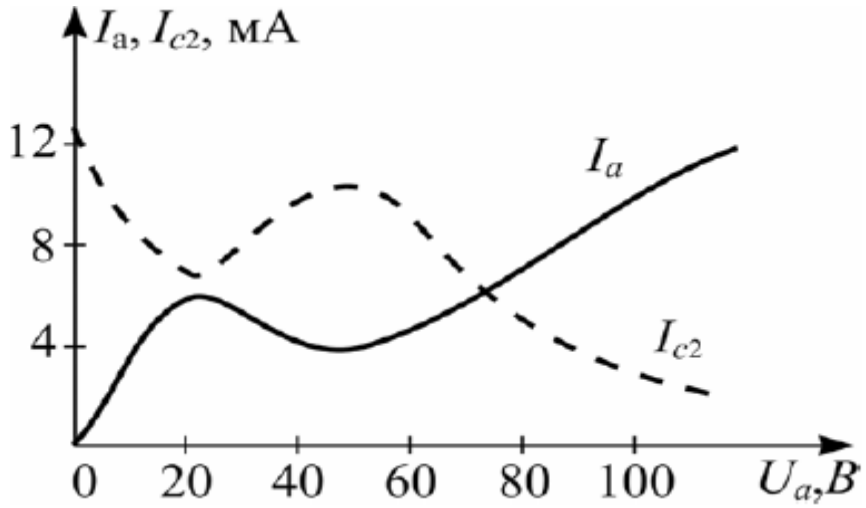


Рисунок 4.1

Аномальний вигляд анодної характеристики пентода (рисунок.4.1) пояснюється виникненням вторинної емісії з поверхні анода при $U_A \geq 20B$. Енергія електронів, які дістаються до анода, виявляється достатньою для вибиття з його поверхні другорядних електронів. Ці електрони під дією більш високої напруги U_{C2} попадають на екранну сітку, та викликають зростання струму I_{C2}. Анодний струм зменшується, з'являється падаюча ділянка характеристики, яка відповідає негативному диференційному збільшенню анодної напруги Uа. При збільшенні анодної напруги анодний струм Iа знову починає зростати, а сітковий I_{C2} зменшується, тому що все більша частина електронів повертається на анод. Це впливання другорядної електронної емісії отримало назву динатронного ефекту. Як видно з графіків, через цей ефект пентод неможна використовувати при малих анодних напругах. Залежність струму другої сітки $I_{C2} = f(U_A)$ приведена на мал.4.1 (пунктир). Для усунення динатронного ефекту між катодом і анодом та другою сіткою встановлена третя захисна (антидинатронна) сітка. Це доволі рідка сітка, з'єднана з катодом, має нульовий потенціал. Вона створює потенційний бар'єр між анодом та екранною сіткою, яка перешкоджає руху другорядних електронів з анода. Введення захисної сітки в лампу значно покращує статистичні параметри пентода.

Пентоди мають дуже великий коефіцієнт посилення (до кількох тисяч), великий внутрішній опір, та малу прохідну ємність. На рисунку 4.2 приведені анодно-сіткової характеристики $I_A = f(U_C)$ пентода.

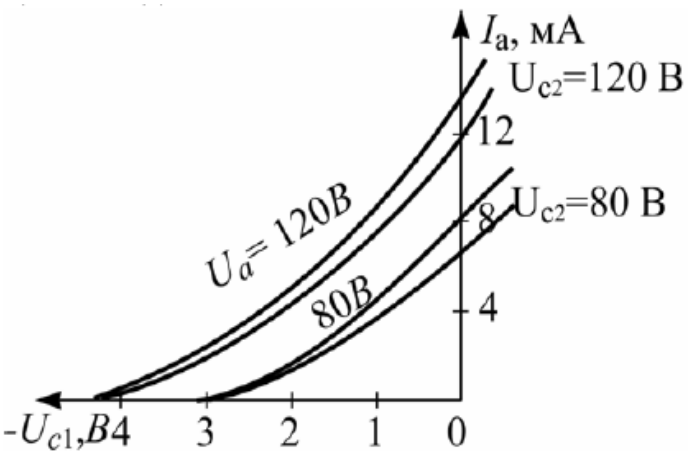


Рисунок 4.2 - Анодно-сіткові характеристики пентода 6Ж2П

На рисунку 4.3 приведені анодні характеристики $I_A = f(U_A)$ для пентода.

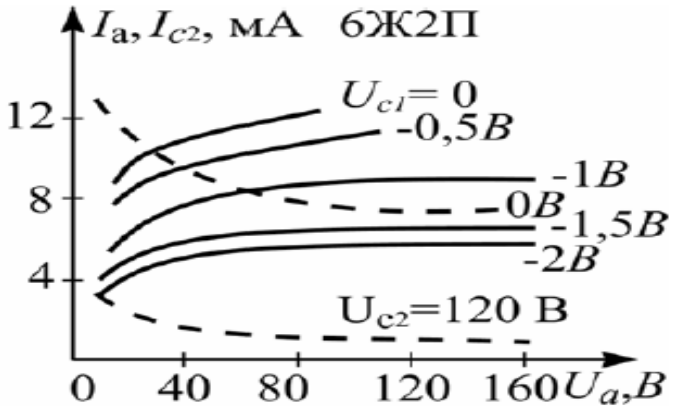


Рисунок 4.3 - Анодні характеристики пентода 6Ж2П

Для оцінки якості лампи використовуються статистичні параметри лампи. Статистичні параметри висвітлюють залежність у одній точці при заданому режимі лампи.

Основні статистичні параметри тріода: крутизна прохідної характеристики

$$S = \frac{dI_A}{dU_{C1}}; при Ua и Uc_2 = const \qquad (4.2)$$

Внутрішній опір лампи по змінному струму (диференційний опір)

$$Ri = \frac{dU_A}{dI_A}; при Uc_1 и Uc_2 = const \qquad (4.3)$$

Опір лампи постійному струму

$$R_0 = Ua / Ia \qquad (4.4)$$

Коефіцієнт підсилення

$$\mu = \Delta U_A/\Delta U_{C1} \quad (4.5)$$

проникність пентода

$$Д = 1/\mu = \Delta U_{C1}/\Delta U_A \quad (4.6)$$

Умовне графічне позначення пентода представлене на рисунку 4.5.

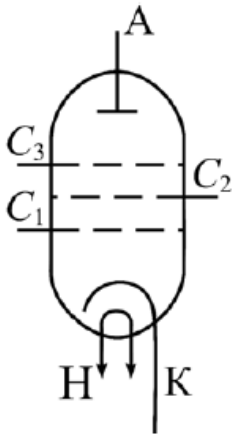
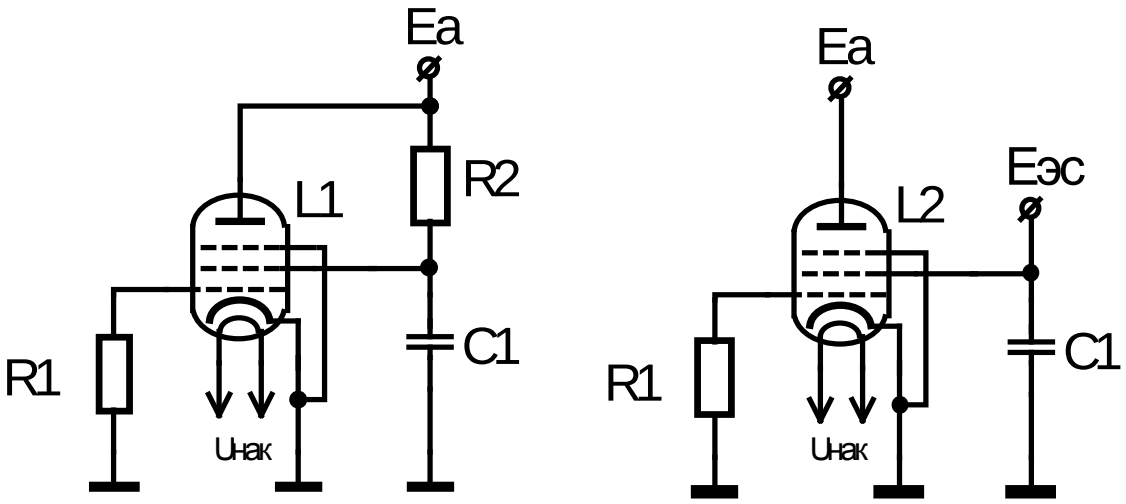


Рисунок 4.5 – Умовне графічне позначення пентода

Схеми ланцюгів, які живлять екранну та антідинатронну (захисну) сітку показано на рисунку 4.6.



а б

а – живлення від джерела живлення Еа, б – живлення від зовнішнього джерела

Рисунок 4.6 – Схеми живлення екранної сітки пентода

Таким чином екранна сітка завдяки шунтуючому конденсатору С1 має завжди постійний потенціал по постійному струму, а по змінному струму завжди має потенціал “загального ланцюга”.

1.4 **Порядок виконання роботи :**

1. Підготувати до роботи лабораторний стенд. Встановити регулювачі анодної та сі точної напруги у крайнє ліве положення. Пересвідчитися (не вмикаючи стенд) що стрілка міліамперметра, який вимірює анодні струми електровакуумних приладів точно знаходиться на відмітці «0» . Встановити перемикачі S2 у верхнє положення, а перемикач S5 у нижнє положення. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

2. Натиснути третю клавішу зліва перемикача на передній панелі стенда, що дає можливість дослідити електровакуумний пентод.

3. Дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин. Встановити напругу на першій сітці пентода (-6В).

4. Змінюючи напругу на аноді пентода від 0 В до 100 В (через 10 В), та фіксуючи при цьому величину анодного струму (вихідну) вольт-амперну характеристику (ВАХ) пентода. **Увага! Величина анодного струму не повинна перевищувати граничної межі вимірювання міліамперметра.** Результати вимірювання занести до таблиці 4.1.

Після закінчення вимірювань встановити регулятор анодної напруги у крайнє ліве положення.

5. Встановити напругу сітки рівною (-3 В). Повторити дії, вказані у п.4.

6. Встановити напругу сітки рівною (+1 В). Повторити дії, вказані у п.4.

7. Побудувати групу вихідних вольт-амперних характеристик для всіх сіткових напруг пентода.

8. Встановити напругу на сітці пентода (-8 В), а напругу на аноді 50 В.

9. Змінюючи напругу на сітці пентода від (-8 В) до +1В (через 1В), та фіксуючи при цьому величину анодного струму , зняти анодно-сіткову вольт-амперну характеристику пентода. Результати занести до таблиці 4.2. Аналогічні дії провести при напрузі 100В та 150В.

Таблиця 4.1 – результати вимірювання анодних (вихідних) ВАХ пентода

№п/п	Напруга на перший сітці, В	Анодна напруга Ua, В	Анодний струм Ia, мА	Опір постійному струму пентода Ro, кОм	Діфференціний опір пентода Ri, кОм
1	+1	0			
….	+1	….			
10	+1	100			
1	-3	0			
….	-3	….			
10	-3	100			
1	-6	0			
….	-6	….			
10	-6	100			

Таблиця 4.2 – Результати вимірювання анодно-сіткових ВАХ пентода

№п/п	Анодна напруга Ua, В	Напруга сітки Uc, В	Анодний струм Ia, мА	Опір постійному струму пентода Ro, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Коефіцієнт. посилення μ	Дифференційний опір пентода Ri, кОм
1	+50	-8					
…..	+50	…..					
10	+50	+1					
1	+100	-8					
…..	+100	…..					
10	+100	+1					
1	+150	-8					
…..	+150	…..					
10	+150	+1					

10. Побудувати групу прохідних вольт-амперних характеристик для всіх анодних напруг пентода.
11. Віджати всі клавіші перемикача S1 і встановити величину напруги живлення анодного ланцюга пентода Ea=150В. Натиснути третю клавішу перемикача S1 (рахунок ведеться зліва на право) на передній панелі стенду. Встановити напругу на сітці пентода -2В, і провести відлік напруги на аноді електровакуумного пентода. Результати вимірювання занести в таблицю 4.3. Встановити напругу на сітці пентода +1В, і провести відлік напруга на аноді електровакуумного тріода. Результати вимірювання занести в таблицю 4.3.
12. Перевести перемикач S2 у нижнє положення. Встановити напругу на сітці пентода -2В, і провести відлік напруги на аноді електровакуумного пентода. Результати вимірювання занести в таблицю 3.3. Встановити напругу на сітці пентода (+1В), і провести відлік напруга на аноді електровакуумного пентода. Результати вимірювання занести в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання коефіцієнта посилення пентода

№п/п	Анодна напруга Ua, В	Напруга на сітці Uc, В	Анодний струм Ia, мА	Опір навантаження пентода Rн, кОм	Коефіцієнт підсилення μ	Положення перемикача S2
1		-2				Вверх
2		+1				
3		-2				Вниз
4		+1				

13. Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруг анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

14. За результатами вимірювань розрахувати наступні характеристики електровакуумного пентода: внутрішній опір пентода постійному струму, диференційний опір, крутизну вольт-амперної характеристики, проникність пентода та коефіцієнт посилення, напругу відсічки.

1.5 У звіті відобразити:

- тему и мету роботи;
- результати вимірювання анодних струмів і напруг;
- результати розрахунку параметрів електровакуумного пентода;
- графіки груп вольт-амперних характеристик пентода;
- висновки по роботі .

1.6 Контрольні запитання

1. Поля яких електродів діють на електронний потік у пентоді?
2. Яке призначення екранної сітки у пентоді?
3. Яке призначення захисної(антидинатронної) сітки у пентоді?
4. Яка причина виникнення антидинатронного ефекту у пентоді?
5. Статичні характеристики пентода.
6. Яка залежність статичних параметрів від положення робочої точки?
7. Яка з міжелектродних ємностей пентода сильніше всього впливає на роботу тріода в області високих частот?
8. Що таке напруга відсічки пентода?
9. Як вимірюється величина напруги відсічки при зміні анодної напруги пентода?
10. Класифікація пентодів.
11. Чому коефіцієнт посилення пентода набагато більший ніж у тріода?

Лабораторна робота № 5

ВИВЧЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ Й ХАРАКТЕРИСТИК ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО КАСКАДУ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА

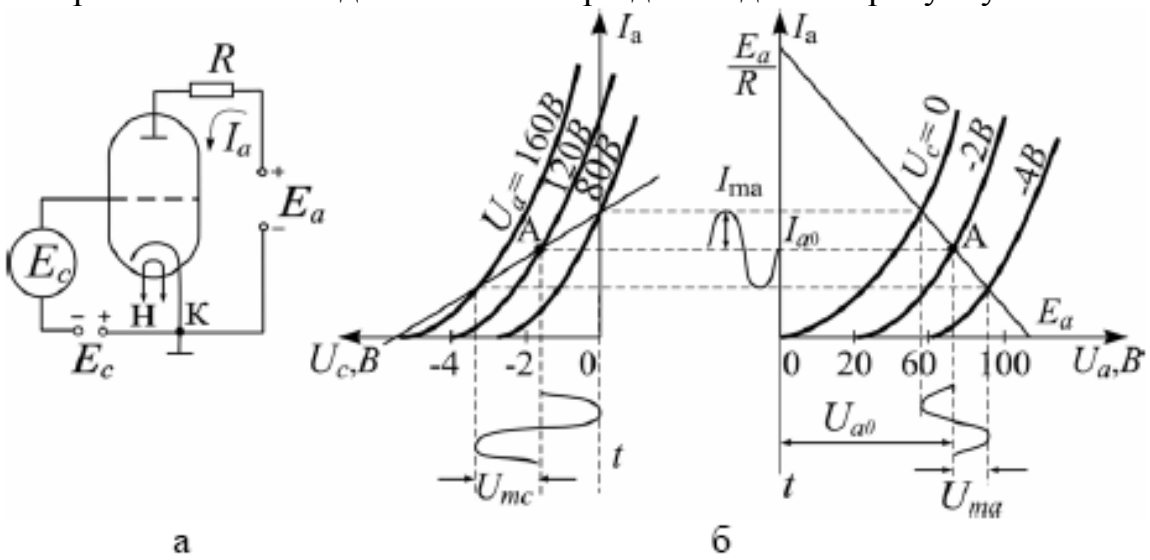
1.1 **Ціль роботи:** вивчити принцип дії й характеристики підсилювального каскаду на основі електровакуумного пентода, включеного за схемою із загальним катодом.

1.2 Зміст роботи: зробити необхідні виміри для побудови динамічної характеристики каскаду на основі електровакуумного пентода. Дослідити роботу каскаду в режимі класу А і в режимі класу В.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Електровакуумні прилади, що мають у своєму складі одну (тріод) або кілька (тетрод, пентод) сіток, призначені для посилення й генерування електричних сигналів. Ці електровакуумні прилади можуть бути використані в наступних пристроях:

1. У каскадах посилення низької частоти.
2. У фазоінверторах для повороту фази напруги.
3. В кінцевих каскадах, зібраних за двотактною схемою для посилення потужності.
4. Як окремий гетеродин у приймачах, телевізорах і вимірювальній апаратурах.
5. Для посилення коливань високої частоти в УКВ діапазоні.

Найпростіша схема підсилювача на тріоді наведена на рисунку 5.1



а - принципова схема підсилювального каскаду на тріоді, б - вольтамперні характеристики каскаду

Рисунок 5.1

Залежно від призначення каскаду, вибирається режим роботи підсилювального елемента (лампи). Лампа, включена в підсилювальний каскад, може працювати як у лінійному, так й в імпульсному режимі. Режим, у якому працює лампа підсилювального каскаду, визначається положенням її робочої точки. Робоча точка лампи це стан лампи при відсутності вхідного сигналу, що характеризується початковим анодним струмом Ia_0, напругою на аноді Ua_0, напругою на керуючій сітці Uc_0 (рисунок 5.1, крапка А).

Напруга анода, при наявності навантаження R в анодному ланцюзі визначається вираженням

$$U_A = E_A - I_A R \tag{5.1}$$

Ця залежність називається навантажувальною характеристикою лампи (рисунок.5.1,*б)*.

Залежно від того, у якому місці навантажувальної прямої перебуває робоча точка лампи, режим роботи каскаду може бути лінійним (клас А) або імпульсний (клас В).

Клас А - режим посилення, при якому анодний струм проходить через лампу протягом усього періоду, й форма змінної складової його є точним відтворенням форми змінної напруги, прикладеного до керуючої сітки. Серед інших класів посилення, режим А самий неекономічний; його к. к. д. становить 15...20%, але цей режим забезпечує найменші спотворення вхідного сигналу. Це зумовлено тим, що енергія від джерела живлення витрачається не тільки на посилення змінної складової вхідного сигналу, але й на створення постійної складової анодного струму Ia_o, що є марною й надалі відтинається розділовим конденсатором. Положення робочої точки, епюри напруг і струмів і навантажувальній прямій показані на рисунку 5.2.

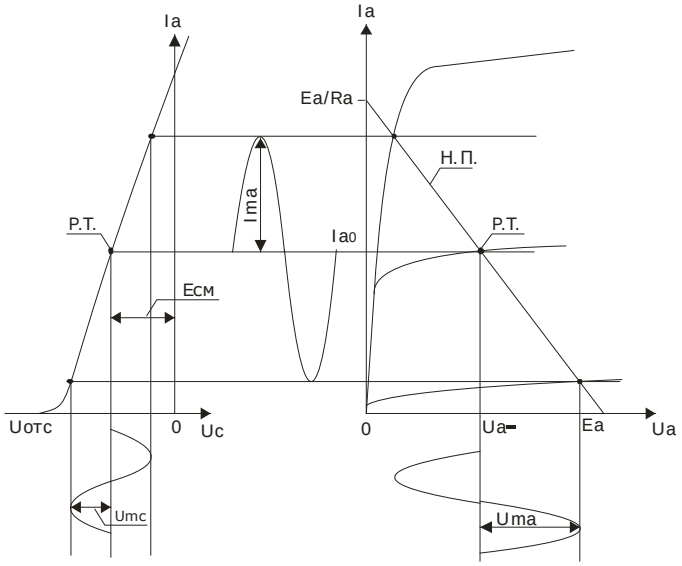


Рисунок 5.2

У режимі роботи класу А робоча точка встановлюється на лінійній ділянці прохідної динамічної характеристики. Для цього на керуючу сітку лампи необхідно подати постійна напруга, що називається напругою зсуву.

Каскади, що працюють у такому режимі, застосовують для посилення слабких сигналів (каскади попереднього посилення).

Клас В - режим посилення, у якому напруга зсуву на керуючій сітці дорівнює величині, при якій анодний струм, що протікає через лампу, близький до нуля тобто напрузі відсічення. Ідеальним (розрахунковим) підсилювачем класу В є підсилювач, у якому форма кривої змінної складової анодного струму є точним відтворенням напівперіоду напруги, прикладеної до

керуючої сітки, і анодний струм протікає точно протягом напівперіоду коливання. Як показано на рисунку 5.3.

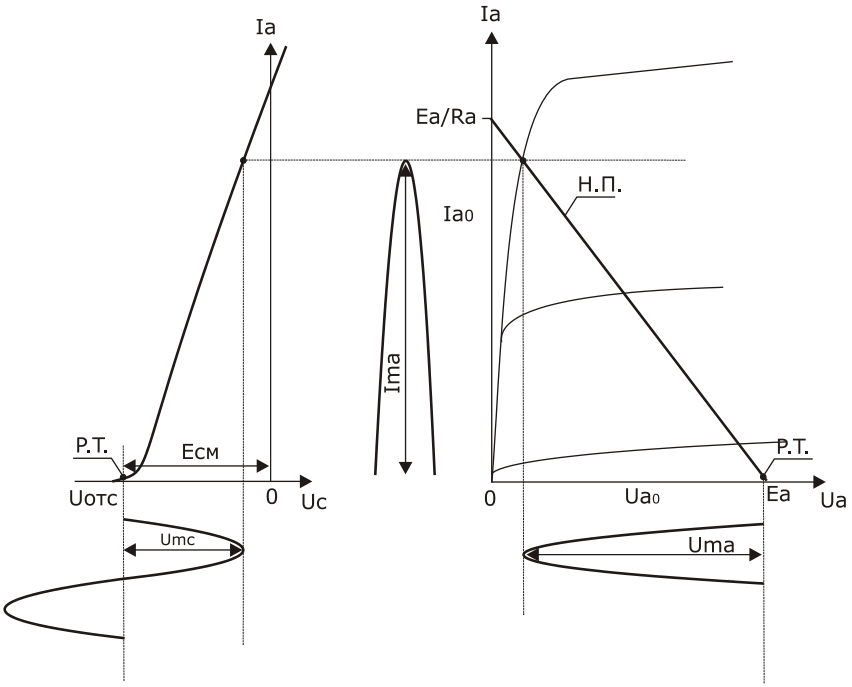


Рисунок 5.3

Режим роботи класу В характеризується кутом відсічення.

Кутом відсічення називається половина тієї частини періоду, за якої у вихідному ланцюзі буде протікати струм. Для режиму класу В кут відсічення Θ = 90°. Характеризується режим класу В високим ККД = 60 - 70 %. Недоліком режиму класу В є велики нелінійні спотворення сигналу. Застосовується режим класу В у вихідних двотактних підсилювачах потужності низької частоти й кінцевих каскадах передавальних пристроїв.

Режим роботи класу В характеризується також ступенем напруженості режиму. Існує три ступені напруженості:

Недонапружений режим - режим, що характерний відсутністю сіткових струмів лампи, а також тим, що імпульсний анодний струм менше величини струму насичення лампи. Такий режим застосовується у двотактних схемах кінцевих каскадах підсилювачів низької частоти.

Напружений режим – режим, при якому можливо появи сіткових струмів і величина імпульсу анодного струму дорівнює току насичення. Такий режим застосовується в кінцевих каскадах передавальних пристроїв.

Перенапружений режим - режим роботи з великими сітковими струмами, при яких з'являється провал в імпульсі струму анодного ланцюга. Такий режим застосовується в кінцевих каскадах передавальних пристроїв й умножувачах частоти.

Крім вище описаних двох основних класів посилення існує клас АВ - проміжний між класами А и В. У цьому режимі напруга зсуву на керуючій сітці має величину, при якій анодний струм протікає через лампу за час, менше, чим період, але більше, ніж напівперіод. При відсутності змінної напруги на керуючій сітці струм через лампу становить дуже малу величину.

Цифри біля букв позначають режим роботи сітки. Цифра 1 указує, що струм у ланцюзі сітки підсилювальної лампи відсутній, а цифра 2 указує на режим підсилювальної лампи зі струмами в ланцюзі, що управляє сітки.

Підсилювач, що працює в режимі класу АВ2, має ККД. до 65%, а в режимі класу АВ1 - до 50%. Режим класу АВ1 застосовується при посиленні потужності до 100 Вт, а режим АВ2 - більше 100 Вт.

Робота лампи в режимі посилення оцінюється за допомогою коефіцієнта підсилення по напрузі:

$$K_U = \frac{U_{ma}}{U_{mc}} = -\frac{\mu}{1+\frac{R_i}{R}} \tag{5.2}$$

де *Uma* - вихідна змінна напруга (*Uвих)*; *Umc* - змінна напруга на першій сітці (*U*вх),

а також з вихідною потужністю

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} R I_{ma}^2 = \frac{1}{2} U_{ma} I_{ma}, \tag{5.3}$$

де I_{ma} – змінна складова анодного струму,

потужність споживана від джерела живлення анодного ланцюга

$$P_A = E_A \cdot I_A \tag{5.4}$$

коефіцієнтом корисної дії анодного ланцюга

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_A} \cdot 100\% \tag{5.5}$$

1.4 **Порядок виконання роботи:**

1. Підготувати до роботи лабораторний стенд. Установити регулятори анодної й сіткової напруг у вкрай ліве положення. Пересвідчитися (не вмикаючи стенд) що стрілка міліамперметру що виміряє анодні струми електровакуумних приладів перебуває точно на оцінці «0». Установити перемикачі S2 у верхнє положення, а перемикач S5 у нижнє положення. Перемикач S3 установити в нижнє положення. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

2. Натиснути третю клавішу зліва перемикача S1 на передній панелі стенда, що дасть можливість досліджувати електровакуумний пентод. Дати прогрітися катоду лампи протягом 2-3 хвилин.

3. Використовуючи анодно-сіткові (прохідні) характеристики, отримані в лабораторній роботі №4 на характеристиці для напруги Ua = 50В, визначити лінійну ділянку. Визначити значення напруг на керуючій сітці пентода для

границь лінійної ділянки. Розрахувати напруга зсуву Uc_0 для режиму класу А, і анодну напругу робочої точки.

4. Установити напругу на першій сітці пентода рівною напрузі зсуву Uc_0.

5. Змінюючи напругу живлення анодного ланцюга пентода, встановити напругу на аноді пентода рівною напрузі робочої точки.

6. Виміряти величину анодного струму й напруги спокою для режиму класу А та результати вимірів занести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати виміру параметрів каскаду на пентоді

Клас роботи підсилювача	Характеристики робочої точки				Характеристики каскаду в сигнальному режимі						
	Напруга сітки Uc_0, В	Анодна напруга спокою Ua_0,	Анодний струм спокою Ia_0, мА В	Напруга живлення анодного кола, Еа	Вихідна напруга каскаду Uma, В	Опір навантаження Ra, кОм	Коефіцієнт посилення каскаду	Анодний струм каскаду Іа, мА В	Вихідна потужність каскаду Рвих, Вт	Потужність, що підводиться до анодного ланцюга каскаду Ра, Вт	К.П.Д. анодного ланцюга, %
А				+50							
А				+100							
А				+150							
В				+50							
В				+100							
В				+150							

7. Подати на гніздо Х1 сигнал з низькочастотного генератора напругою 0,1В и частотою 1 кГц. Вихідний сигнал каскаду (Uma), що знімається із гнізда Х2, подати на осцилограф. Зробити налаштування осцилографа для зручного спостереження вихідного сигналу (вибрати межу виміру амплітуд, необхідну швидкість розгорнення, зробити внутрішню синхронізацію сигналу). Збільшуючи вихідний сигнал генератора (вхідна напруга каскаду) і спостерігаючи за вихідним сигналом відзначити момент, коли вихідний сигнал почне спотворюватися (обмежуватися). Якщо сигнал обмежується тільки з однієї сторони зміною напруги на керуючій сітці пентода спробувати усунути спотворювання й продовжити збільшення вхідного сигналу. При правильно обраній робочій точці, обмеження сигналу повинне відбуватись по обидва боки одночасно. Замалювати епюри вхідного й вихідного сигналів. Якщо напруга вхідного сигналу більше 1В встановити його рівне 1В и виміряти амплітуду вхідного сигналу.

8. Розрахувати коефіцієнт підсилення каскаду потужність і ККД анодного ланцюга.

9. Виконати пункти 4-9 для напруг живлення анодного ланцюга пентода *Ea= 100B.* і *Ea= 150B*

10. Для дослідження каскаду в режимі класу В установити напругу живлення анодного ланцюга пентода *Ea= 50B.*і напругу на першій сітці U_{c_0} = -10В

11. Для забезпечення роботи каскаду в режимі класу В, змінюючи напругу зсуву на першій сітці пентода, встановити величину струму в анодному ланцюзі пентода *Ia=0,5мА.* Подати на вхід каскаду через гніздо X1 сигнал з низькочастотного генератора напругою 1В и частотою 1 кГц. Вихідний сигнал каскаду (Uma), що знімається із гнізда X2, подати на осцилограф. Зробити налаштування осцилографа для зручного спостереження вихідного сигналу (вибрати межу виміру амплітуд, необхідну швидкість розгорнення, зробити внутрішню синхронізацію сигналу). Збільшуючи вихідний сигнал генератора (вхідна напруга каскаду) і спостерігаючи за вихідним сигналом відзначити момент, коли вихідний сигнал почне спотворюватися (обмежуватися) знизу. Результати вимірів занести в таблицю.

12. Розрахувати коефіцієнт підсилення каскаду потужність і ККД анодного ланцюга.

13. Установити напругу живлення анодного ланцюга пентода *Ea= 100B.* і повторити дії п.11 і п.12.

14. Установити напругу живлення анодного ланцюга пентода *Ea= 150B.* і повторити дії п.11 і п.12.

15. Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруг анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

1.5 У звіті відобразити:

- тему й ціль роботи;
- результати виміру струмів і напруг;
- результати розрахунків параметрів каскаду на електровакуумному пентоді;
- епюри сигналів у сіткових й анодних ланцюгах каскаду (на вольтамперних характеристиках пентода);
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні питання

1. У яких режимах працюють підсилювальні каскади ?
2. Фізичне поняття робочої точки підсилювального каскаду.
3.Основні характеристики підсилювального каскаду.
4. Чому в каскадах попереднього посилення лампи працюють у режимі класу А.
5. Чому в кінцевих каскадах підсилювачів лампи працюють у режимі класу В (АВ) ?
6. Яка залежність статичних параметрів від положення робочої точки?
7. Способи визначення їх по характеристиках.
8.Які елементи впливають на широкополосність каскаду?
9. Що таке кут відсічення, і від яких параметрів каскаду він залежить?
10. Чому коефіцієнт нелінійних перекручувань у каскаду працюючого в режимі класу А мінімальний?
11. Які елементи каскаду впливають на його коефіцієнт підсилення?

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБІЛІТРОНА ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДА

1.1 **Мета роботи:** дослідити принцип дії та характеристики стабілітрона тліючого розряду.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для побудови вольт-амперної характеристики стабілітрона тліючого розряду та розрахунку його параметрів.

1.3 Короткі теоретичні відомості:

Стабілітрон тліючого розряду – це газорозрядний прилад, який призначений для стабілізації постійної напруги у другорядних джерелах живлення радіоелектронної апаратури.

Газовим розрядом називається процес проходження електричного струму через газове середовище. Розряди, викликані дією зовнішнього електричного іонізатора (електричне поле, радіоактивне випромінювання, космічне проміння, світлове випромінювання), називаються несамостійними газовими розрядами. Густина електричного струму описується наступним виразом

$$j = j_+ + j_- \tag{6.1}$$

$$j_+ = n^+ e^+ b^+ E - e^+ D^+ \frac{dn^+}{dx}, \quad j_- = n^- e^- b^- E - e^- D^- \frac{dn^-}{dx}$$

де j^+ та j^- - густини струмів позитивних та негативних іонів, n^+ и n^- - концентрації іонів різних знаків, b^+ и b^- - їх рухливість , e^+ и e^- - заряди іонів, E – напруженість електричного поля при якому у газі виникає впорядкований рух іонів, D^+ та D^- - коефіцієнти дифузії іонів. Напруга при якій виникає самостійний заряд у газовому середовищі називається напругою пробою газу. Величина напруги пробою газу залежить від тиску газового середовища та відстанню між електродами зовнішнього іонізатора та описується законом Пашена

$$V_{пр} = k\frac{P}{d} \tag{6.2}$$

де P – тиск газу, а d – відстань між електродами зовнішнього іонізатора.

У процесі проходження електричного струму через газове середовище у ньому можуть виникнути наступні види розрядів:

- тліючий розряд,
- іскровий розряд ,
- коронний розряд ,
- дуговий розряд.

Самостійний розряд, у якому електрони випускаються катодом під дією доданих іонів газу, називають тліючим розрядом. Такий розряд характеризується більшою напруженістю електричного поля та великою

різністю потенціалів біля катоду, яка зумовлена великою концентрацією доданих іонів. Тліючий розряд використовується в техніці як джерело світлової енергії у різноманітних газорозрядних трубках, а також для створення стабільних джерел опорної напруги (стабілітронів).

Вольт-амперна характеристика стабілітрона, приведена на рисунку. 6.1 має ділянку, на якій при достатньо великих змінах струму (від мінімального $i_{МИН}$, до максимального i_{MAX}) через стабілітрон напруга на його електродах змінюється незначною мірою. Така напруга називається напругою стабілізації, і цей параметр є одним з основних параметрів стабілітрона.

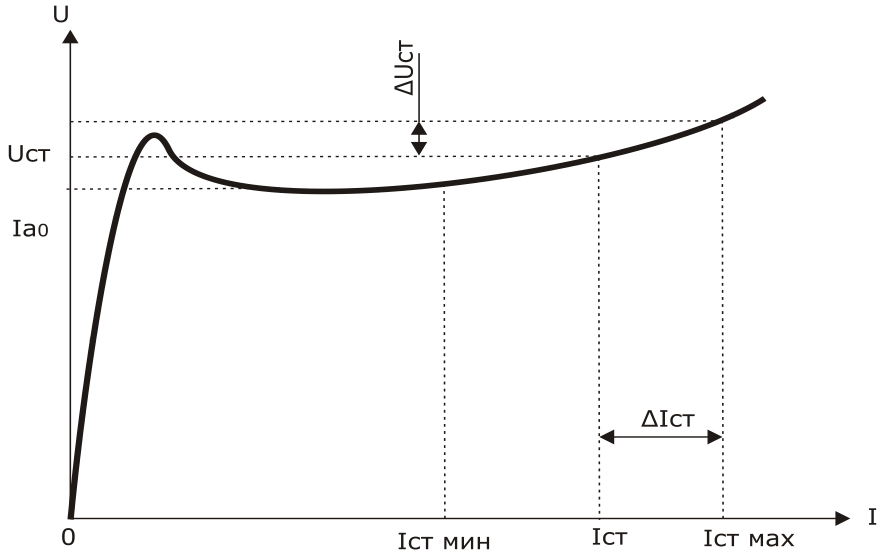


Рисунок 6.1

Номінальному значенню струму стабілізації ($i_{ст}$) відповідає напруга стабілізації ($U_{ст}$). При зміні струму стабілізації від мінімального до максимального значення має сенс змінення напруги стабілізації на величину ($\Delta U_{ст}$) яка називається зміною напруги стабілізації або нестабілізацією.

Диференційний опір стабілітрона знаходиться як відношення

$$R_g = \frac{\Lambda U_{CT}}{\Lambda I_{CT}}. \qquad (6.3)$$

Внутрішній опір знаходиться як відношення

$$R_i = \frac{U_{CT}}{I_{CT}}. \qquad (6.4)$$

Також якість стабілітронів знаходиться за таким параметром як часова нестабільність вихідної напруги

$$\delta = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta t}. \qquad (6.4)$$

де Δt – інтервал часу, за який вихідна напруга змінилась на величину ΔUст.

Схема включення газорозрядного стабілітрона тліючого розряду показана на рисунку 6.2.

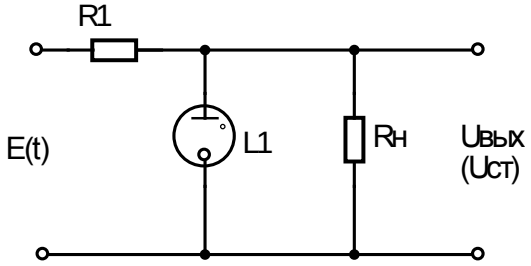


Рисунок 6.2 – Схема включення газорозрядного стабілітрона тліючого розряду

Резистор R1 потрібен для обмеження струму через стабілітрон.

Коефіцієнт стабілізації такої схеми розраховується як

$$K_{CT} = \frac{\Lambda E}{\Lambda U_{ВЫХ}} = 1 + \frac{R1}{R_i} + \frac{R1}{R_н}. \qquad (6.4)$$

При досить малих значеннях Ri цей вираз спрощується до

$$\Delta U_{ВЫХ} \cong \Delta E \cdot \frac{R_i}{R1} << \Delta E \qquad (6.4)$$

Приведені формули показують суттєву роль резистора R1 виділяється змінна за часом частина вхідної напруги. При цьому ступінь стабілізації вихідної напруги обернено пропорційний внутрішньому опору стабілітрона *Ri.*

1.4 **Порядок виконання роботи:**

1. Підготувати до роботи лабораторний стенд. Встановити перемикачі анодної на сіточної напруги у крайнє ліве положення. Пересвідчитися (не вмикаючи стенд) що стрілка міліамперметра, який вимірює анодні струми електровакуумних приладів знаходиться точно на «0». Встановити перемикачі S2 у нижнє положення, а перемикач S5 у нижнє положення. Перемикач S3 встановити у нижнє положення. Подати напругу живлячої мережі і ввімкнути його за допомогою вмикача. При ввімкнені повинен загорітися індикаторний світлодіод над вмикачем.

2. Натиснути четверту клавішу зліва перемикача S1 на передній панелі стенда, що дає можливість дослідити газорозрядний стабілітрон тліючого розряду.

3. Змінюючи напругу на аноді стабілітрона від 0 ***В*** до140 ***В*** (через 10 ***В***), фіксуючи при цьому величину анодного струму, зняти вольт-амперну характеристику (ВАХ) стабілітрона.

Результати вимірювань занести до табл. 6.1. Розрахувати внутрішній і диференційний опір та коефіцієнт стабілізації. Побудувати ВАХ стабілітрона.

Таблиця 6.1 – результати вимірювань та розрахунок параметрів газорозрядного стабілітрона

№ п/п	Анодна напруга, В	Анодний струм, мА	Внутр., опір кОм	Диферен-ційний опір, кОм	Іст min	Іст мах	Положення тумблера S2	Коефіцієнт стабілізації
1	0						розімкнуто	
2	10						розімкнуто	
3	20						розімкнуто	
4	30						розімкнуто	
5	40						розімкнуто	
6	50						розімкнуто	
7	60						розімкнуто	
8	70						розімкнуто	
9	80						розімкнуто	
10	90						розімкнуто	
11	100						розімкнуто	
12	110						розімкнуто	
13	120						розімкнуто	
14	130						розімкнуто	
15	140						розімкнуто	
16	0						замкнуто	
17	10						замкнуто	
18	20						замкнуто	
19	30						замкнуто	
20	40						замкнуто	
21	50						замкнуто	
22	60						замкнуто	
23	70						замкнуто	
24	80						замкнуто	
25	90						замкнуто	
26	100						замкнуто	
27	110						замкнуто	
28	120						замкнуто	
29	130						замкнуто	
30	140						замкнуто	

4. Встановити тумблер S2 у верхнє положення. Повторити дії, вказані у п.3.

5.Після закінчення виконання робіт встановити регулятори напруг анодного та сіткового джерел в крайнє ліве положення. Вимкнути стенд за допомогою вимикача. При вимкненні повинен згаснути індикаторний світлодіод над вимикачем. Відключити стенд від живильної мережі.

1.5 У звіті відобразити:

- тему та мету роботи;
- результати вимірювання струмів та напруг у ланцюгах газорозрядного стабілітрона тліючого розряду;
- результати розрахунку параметрів газорозрядного стабілітрона тліючого розряду;
-вольт-амперні характеристики газорозрядного стабілітрона тліючого розряду;
- висновки по роботі.

1.6 Контрольні запитання

1. Які види розрядів можуть бути у газових середовищах ?
2. Який принцип дії стабілітрона тліючого розряду?
3. Охарактеризувати схему включення газорозрядного стабілітрона тліючого розряду.
4. Що характеризує коефіцієнт стабілізації?
5. Які переваги та недоліки газорозрядних стабілітронів тліючого розряду.
6. Як залежить коефіцієнт стабілізації від величини струмообмежуючого резистора?
7. Як залежить коефіцієнт стабілізації від величини опору навантаження?

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДХИЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОННОПРОМЕНЕВОЇ ТРУБКИ З ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИМ УПРАВЛІННЯМ

1.1 **Мета роботи:** дослідити принцип дії і характеристики електронно-променевої трубки (ЕПТ) з електростатичним управлінням і виміряти параметри її відхиляючої системи.

1.2 Зміст роботи: провести необхідні вимірювання для розрахунку параметрів, що характеризують кількісні характеристики каналу вертикального відхилення ЕПТ з електростатичним управлінням.

1.3 Короткі теоретичні відомості: Електронно-променеві трубки (ЕПТ) з електростатичним управлінням, тобто з фокусуванням і відхиленням променя електричним полем, називаються електростатичними трубками і особливо широко застосовуються в осцилографах. Окрім того ЕПТ з електростатичним управлінням застосовуються як індикатори (екрани радіолокаторів і гідролокаторів, дисплеї, пристрої обробки повітряної і надводної інформації).

Структура ЕПТ з електростатичним управлінням показана на рисунку 7.1. Балон трубки має циліндрову форму з розширенням у вигляді конуса або у вигляді циліндра більшого діаметру. На внутрішню поверхню підстави розширеної частини нанесений люмінофор - шар речовин, здатних випромінювати оптичне випромінювання під ударами електронів. Усередині трубки розташовані електроди, що мають висновки, в основному, на жорсткі металеві штирки цоколя.

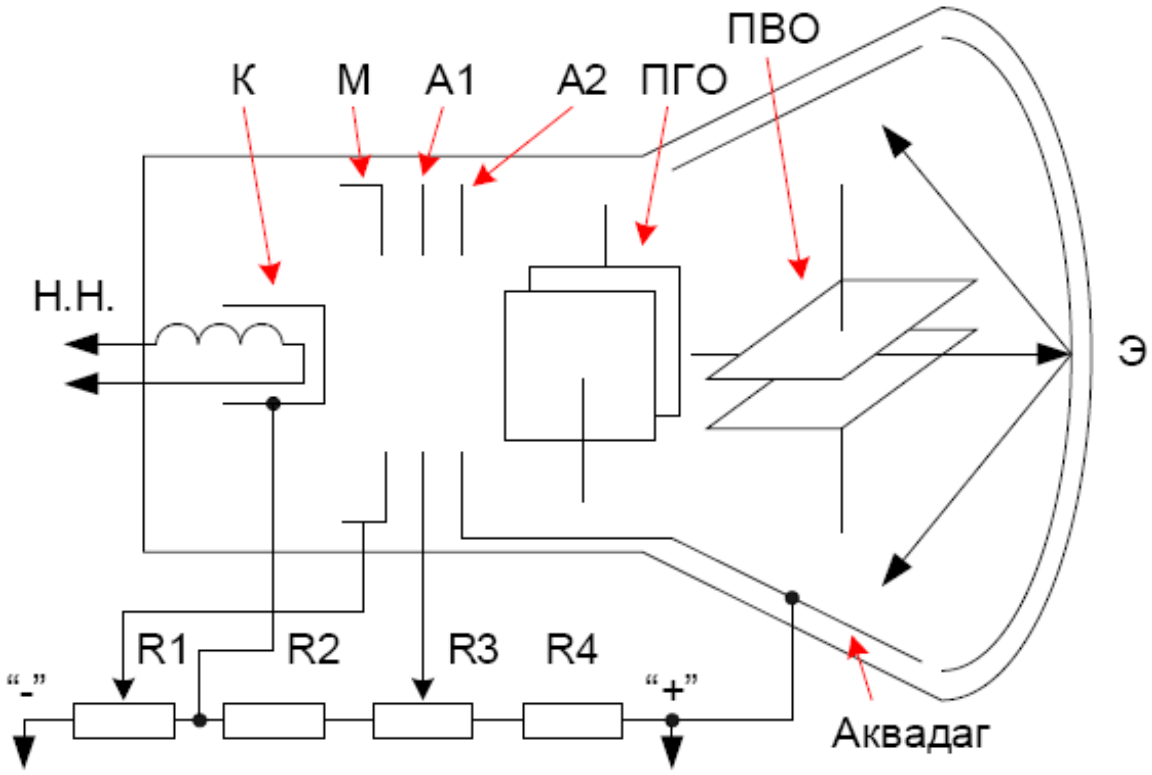


Рисунок 7.1

Катод ЕПТ - оксидний непрямого розжарювання. Виведення катода іноді суміщене з одним з виведень підігрівача. Оксидний шар нанесений на дно катода.

Навколо катода розташовується електрод, циліндрової форми з отвором в дні – модулятор. Цей електрод служить для управління щільністю електронного потоку і для попереднього його фокусування. На модулятор подається негативна напруга в декілька десятків вольт. Чим це напруга більше, тим більше електронів повертається на катод. При певній негативній напрузі модулятора трубка закривається.

Інші електроди, також циліндрової форми, є анодами. У ЕПТ їх мінімум два. Перший анод називається прискорюючим електродом. Другий анод називають фокусуючим електродом. На другий анод подається напруга до декількох кіловольт (близько 20 кВ), а на перший анод подається напруга від 500В до 850В. Усередині анодів є перегородки з отворами (діафрагми). Під дією поля першого анода, яке прискорює електрони. вони набувають значної швидкості. Остаточне фокусування електронного потоку здійснюється за допомогою неоднорідного електричного поля в просторі між анодами, а також завдяки діафрагмам. Складніші фокусуючи системи містять більше число циліндрів.

Система, що складається з катода, модулятора і анодів, зветься електронним прожектором (електронною гарматою) і служить для створення електронного променя, тобто тонкого потоку електронів, що летять з великою швидкістю від другого анода до люмінесцентного екрану.

На шляху електронного променя поставлені під прямим кутом один до одного дві пари відхиляючих пластин ПВВ і ПГВ. Напруга, підведена до них, створює електричне поле, що відхиляє електронний промінь у бік позитивно зарядженої пластини. Поле пластин для електронів є поперечним (рис. 7.2). У такому полі електрони рухаються по параболічних траєкторіях, а, вийшовши з нього, далі рухаються за інерцією прямолінійно, тобто електронний промінь одержує кутове відхилення.

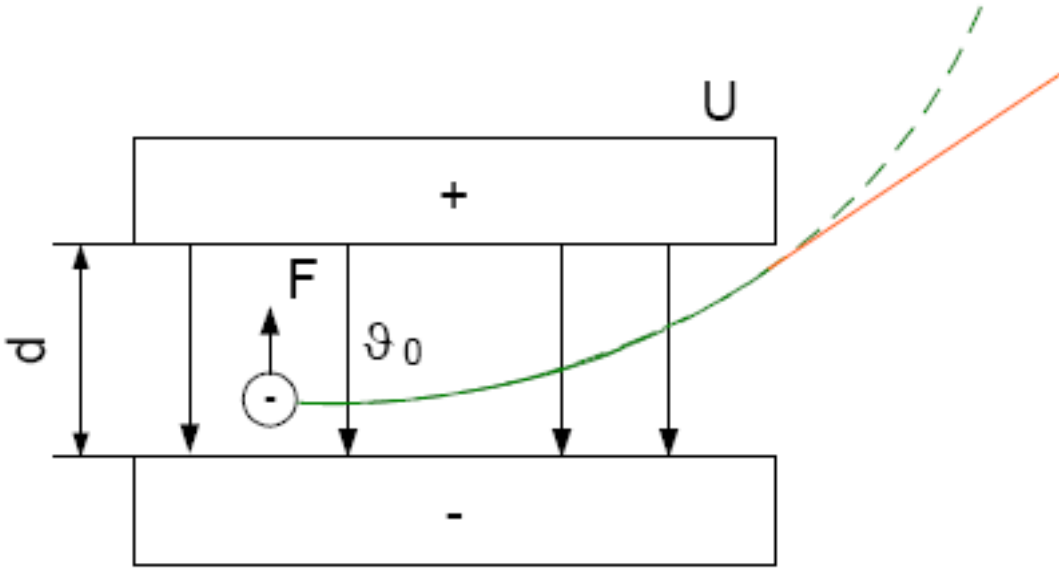


Рисунок 7.2

Чим більше напруга на пластинах, тим сильніше відхиляється промінь і тим більше зміщується на люмінесцентному екрані що світиться, так звана електронна пляма, що виникає від ударів електронів. Пластини ПВВ, що відхиляють промінь по вертикалі, називаються пластинами вертикального відхилення, а пластини ПГВ - пластинами горизонтального відхилення. Одна пластина кожної пари іноді з'єднується із загальним дротом. Таке включення пластин називається несиметричним.

Оскільки на електронний промінь можуть впливати сторонні електричні і магнітні поля, то трубку часто поміщають в екрануючий чохол з магнітомягкой стали.

Свічення люмінесцентного екрану пояснюється збудженням атомів речовини екрану. Електрони, ударяючи в екран, передають свою енергію атомам екрану, в яких один з електронів переходить на віддалену від ядра орбіту. При поверненні електрона назад, на свою орбіту, випромінюється квант світлової енергії (фотон), і спостерігається свічення. Це явище називається катодолюмінісценцією, а речовини, що світяться під ударами електронів, називаються катодолюмінофорамі, або просто люмінофорами.

Електрони, що потрапляють на екран, можуть зарядити його негативно і створити гальмуюче поле (поле об'ємного заряду), що зменшує їх швидкість. Від цього зменшиться яскравість свічення екрану і може взагалі припинитися попадання електронів на екран. Тому необхідно знімати негативний заряд з екрану.

Для цього на внутрішню поверхню балона наноситься провідний шар. Він звичайно буває графітовим і називається аквадагом. Аквадаг з'єднується з другим анодом. Вторинні електрони, що вибиваються з екрану ударами первинних електронів, летять до провідного шару. Після відходу вторинних електронів потенціал екрану звичайно близький до потенціалу провідного шару. У деяких трубках є вивід від провідного шару, який можна використовувати як додатковий анод з вищою напругою. При цьому електрони додатково прискорюються після відхилення в системі відхиляючих пластин, що називається післяприскоренням. Провідний шар також виключає скупчення на стінках балона негативних зарядів від потрапляючих туди електронів. Ці заряди можуть створювати додаткові поля, що порушують нормальну роботу трубки. Якщо в трубці провідного шару немає, то вторинні електрони йдуть з екрану на відхиляючі пластини і другий анод.

Живлення електронного прожектора здійснюється через дільник напруги. Щоб регулювання яскравості менше впливало на фокусування, перший анод роблять без діафрагм. На нього електрони не потрапляють, тобто струм першого анода рівний нулю. Сучасні електронні прожектори дають на екрані пляму, що світиться, з діаметром менше 0,002 від діаметру екрану.

Відхилення електронного променя електростатичним методом з утворенням плями, що світиться на екрані, пропорційно напрузі на відхиляючих пластинах. Коефіцієнт пропорційності в цій залежності називається **чутливістю відхиляючої системи ЕПТ.**

Якщо позначити відхилення плями по вертикалі через **y**, а напруга на пластинах y через **Uy**, то

$$y = Sy \cdot Uy \qquad (7.1),$$

де Sy – чутливість трубки для пластин **y**.
Подібно до цього відхилення крапки, що світиться, по горизонталі

$$x = Sx \cdot Ux \qquad (7.2)$$

Таким чином, **чутливість електростатичної трубки - це відношення відхилення крапки, що світиться, на екрані до відповідної відхиляючої напруги**:

$$Sx = x / Ux \text{ и } Sy = y / Uy \qquad (7.3)$$

Чутливість ЕПТ (мм/В) – чисельно дорівнює відхиленню крапки, що світиться, при зміні відхиляючої напруги на 1В. Іноді під чутливістю розуміють величину, зворотну Sx або Sy, і виражають її у вольтах на міліметр. Якщо збільшити у декілька разів напругу Uy, то в стільки ж разів зросте y, а значення Sy залишиться без зміни. Отже, значення Sy не залежить від Uy. Чутливість знаходиться в межах 0,1 – 1,0 мм/В. Вона залежить від напруг на електродах ЕПТ і геометричних розмірів трубки.

1.4 Порядок виконання роботи:

1. Для виконання досліджень необхідно підготувати до роботи осцилограф С1-67 (відповідно до керівництва по експлуатації) і блок живлення Б5-45 з діапазоном вихідної напруги 0-50 В. Використання осцилографа С1-67 обумовлене тим, що його конструкція забезпечує подачу напруги безпосередньо на вертикально-відхиляючі пластини.
2. Для виконання вимірювання чутливості вертикально-відхиляючих пластин необхідно перемкнути досліджувані пластини на зовнішні гнізда за допомогою перемикача, який знаходиться на лівій бічній стінці осцилографа. Перевести канал горизонтального відхилення осцилографа в режим посилення (відключивши генератор розгортки). Встановити за допомогою регулятора горизонтального зсуву променя пляму, що світиться, в центр екрану.
3. За допомогою регуляторів «яскравість», «фокусування» одержати мінімально можливий діаметр крапки, що світиться, в центрі екрану.
4. Зміряти довжину вертикальної шкали екрану ЕПТ (за допомогою штангенциркуля) і визначити ціну малого ділення вертикальної шкали в мм.
5. Подати напругу від джерела Б5-45 безпосередньо на відхиляючі пластини ЕПТ осцилографа і, збільшуючи напругу на його виході, спостерігати за відхиленням променя від центру екрану. При відхиленні променя від центру на величину великого ділення вертикальної шкали ЕПТ, виміряти напругу на виході джерела Б5-45 за допомогою вбудованого вольтметра. Збільшення

вихідної напруги і її вимірювання проводити доти, поки промінь не досягне останньої відмітки на екрані. Результати вимірювань занести в таблицю 7.1

Таблиця 7.1 Результати розрахунку чутливості вертикально відхиляючих пластин ЕПТ

№ п.п	Напруга на пластинах Uпл,В	Зсув променя L, мм	Чутливість пластин ЭЛТ Sy, В/мм
1	+		
2	+		
3	+		
4	+		
5	-		
6	-		
7	-		
8	-		

6. Встановити вихідну напругу джерела Б5-45 рівною нулю. Змінити полярність напруги, що подається на вертикально-відхиляючі пластини ЕПТ шляхом перемикання дротів на вихідних затисках джерела Б5-45. Повторити дії вказані в п. 5.

7. Побудувати графік залежності величини відхилення променя на екрані ЕПТ від величини напруги, прикладеної до вертикально - відхиляючих пластин. Розрахувати величину чутливості вертикально-відхиляючих пластин ЕПТ і переконатися що залежність відхилення променя від напруги на пластинах ЕПТ лінійна.

1.5 У звіті відобразити:

- тему і мету роботи;
- результати вимірювання напруги на вертикально - відхиляючих пластинах ЕПТ;
- результати розрахунків чутливості вертикально - відхиляючих пластин ЕПТ;
- графіки залежності величини відхилення променя від прикладеної до вертикально - відхиляючих пластин напруги.
- висновки.

1.6 Контрольні питання

1. Які види керування електронним променем застосовують у електронно-променевих трубках.
2. Принцип дії електронно-променевої трубки.
3. Які методи фокусування електронного променя застосовуються в ЕПТ.
4.Для чого у складі ЕПТ знаходяться горизонтально-відхиляючі і вертикально - відхиляючі пластини в ЕПТ?
5. Як називається речовина, якою покривають екран ЕПТ.
6. Для яких цілей служить перший анод в ЕПТ?
7. Для яких цілей служить другий анод в ЕПТ?
8. Що характеризує чутливість відхиляючої системи ЕПТ?
9. Від яких конструктивних параметрів ЕПТ залежить чутливість відхиляючої системи і швидкодія ЕПТ?
10. Від яких параметрів ЕПТ залежить чутливість відхиляючої системи?

ВВЕДЕНИЕ

Согласно требований образовательно-профессиональной программы в соответствии с направлением «Компьютерные науки» и рабочей программы курса «Вакуумная и плазменная электроника» студенты направления 0908 «Электроника» специальности 6.90804 «Физическая и биомедицинская электроника» после изучения отмеченной дисциплины должны уметь провести анализ и расчет электрических цепей каскадов построенных на электровакуумных приборах и овладеть навыками проведения измерений электрических параметров и анализа функциональных зависимостей последних.

С этой целью студентам предлагаются для самостоятельного выполнения лабораторные работы, поставленные на специальных стендах в аудиториях кафедры ФБМЕ.

Студент допускается к выполнению очередной работы практикума после подтверждения (в форме компьютерного тестирования или карточек) наличия необходимых знаний теоретического материала и порядка выполнения работы.

Для зачета выполненной лабораторной работы студент должен предъявить преподавателю и защитить индивидуальный отчет из выполненной работы, обосновавши полученные результаты и построенные функциональные зависимости.

Согласно модульно-рейтинговой системы организации учебного процесса в рабочей учебной программе приведено деление максимальных баллов рейтинга по всем видам учебной работы данной дисциплины. Лектор конкретизирует (в зависимости от запланированного количества лабораторных работ, вида индивидуальных заданий и др.) деление рейтинговых баллов на текущий семестр, о чем студентов информируют в начале семестра.

Отчеты лабораторного практикума выполняются согласно с общими правилами оформления научно-технических отчетов и в соответствии с требованиями Госстандарта и международной системы единиц СИ. Для написания отчетов используются листы бумаги формата А4, диаграммы и графики размещают на миллиметровом или специально разлинованной бумаге. Зачтенные работы сохраняются на кафедре на протяжении учебного года.

Критерии оценивания выполненных лабораторных работ.

Согласно Положения про кредитно - модульную систему, лабораторная работа считается таковой, при условии ее выполнения, написания соответствующего отчета и его защиты. Вопросы из материала лабораторной работы могут быть приобщены к тестовым вопросам модульного контроля.

Лабораторная работа № 1

ИЗУЧЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

1.1 Цель работы: изучить принцип действия и принципиальную схему и органы управления лабораторного стенда, овладение навыками работы с электроизмерительными приборами стенда, изучить основные правила техники безопасности при проведении экспериментов, а также получить необходимые знания для выполнения последующих лабораторных работ.

1.2 Содержание работы: определить предел измерений, цену деления, класс точности, абсолютную погрешность измерения каждого из измерительных приборов входящих в состав стенда. Научиться управлению источниками питания стенда для дальнейшего исследования характеристик электровакуумных и ионных приборов.

1.3 Описание лабораторного стенда

Стенд для проведения лабораторных работ выполнен в виде самостоятельного блока в состав, которого входят встроенные источники питания с регулируемыми выходными напряжениями, стрелочные измерительные приборы, исследуемые электровакуумные приборы (лампы) и газоразрядные (плазменные приборы). Принципиальная электрическая схема стенда приведена на рисунке 1.1.

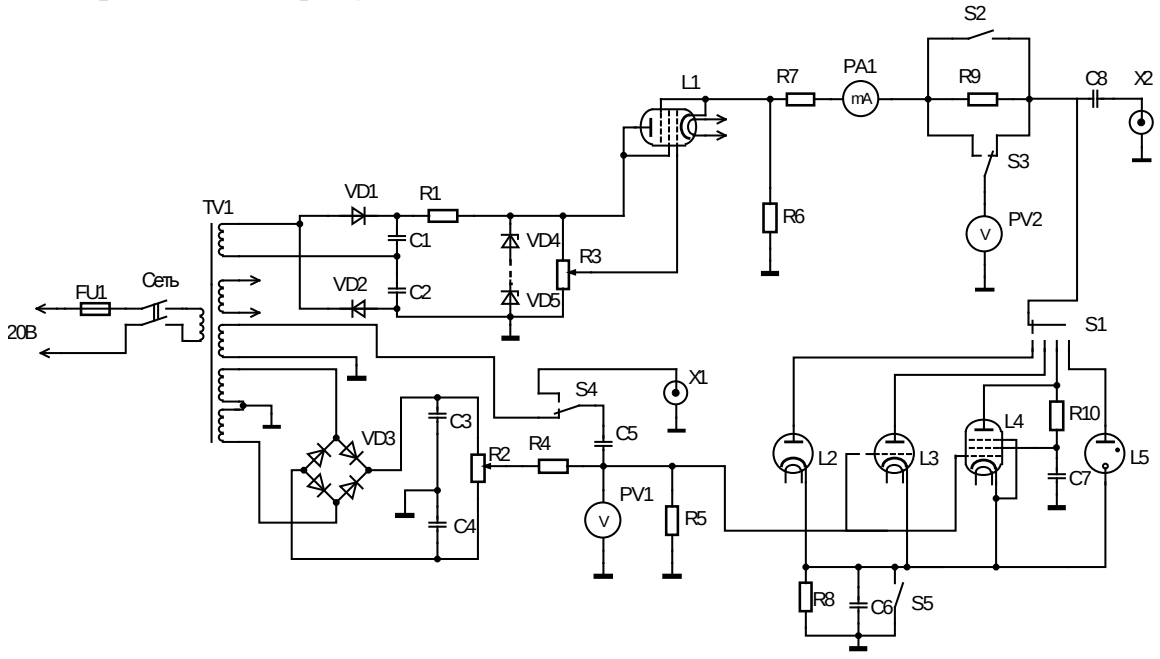


Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема стенда

В состав стенда входят электровакуумные приборы L2 - L4 (L2 – диод, L3 – триод, L4 – пентод) и L4 – стабилитрон тлеющего разряда. Анодные цепи электровакуумных приборов подключаются к источнику анодного напряжения с помощью переключателя S1, и таким образом выбирается только один прибор, характеристики которого исследуются в лабораторной работе. Для исследования анодных характеристик электровакуумных приборов в состав стенда входит источник регулируемого анодного напряжения. В состав источника входит выпрямитель выполненный по схеме удвоения напряжения построенного на диодах VD1 - VD2 и конденсаторах C1 и C2. Цепь, состоящая из резистора R1 и полупроводниковых стабилитронов VD4, VD5 осуществляет стабилизацию уровня выходного напряжения источника питающего анодные цепи стенда. Резистор R3 и лампа L1 обеспечивают регулировку выходного напряжения источника питания в пределах от 0 до 200В. Вольтметр PV2 измеряет выходное напряжение источника или напряжение на аноде соответствующего электровакуумного прибора (в зависимости от положения переключателя S3). Для измерения анодного тока исследуемой лампы предназначен миллиамперметр PA1. резисторы R7 и R9 выполняют роль анодной нагрузки.

Для исследования анодно-сеточных характеристик электровакуумных приборов в состав стенда входит источник регулируемого сеточного напряжения. Источник сеточного напряжения состоит из выпрямителя со средней точкой. Он построенного по мостовой схеме, на диодном мосте VD3 конденсаторах C3 и C4. Благодаря этому на выходе выпрямителя при вращении ручки потенциометра R2 может быть установлено как положительное, так и отрицательное сеточное напряжение. Для измерения напряжения на управляющей сетке исследуемых ламп предназначен вольтметр PV1, который имеет нулевую отметку в центре шкалы. Резистор R5 обеспечивает нормальный режим сеточных цепей исследуемых приборов.

Резистор R8 и конденсатор C6 образуют цепь автоматического смещения для исследуемых триода и пентода, а переключатель S5 позволяет производить ее отключение.

Резистор R10 и конденсатор C7 образуют цепь питания экранной сетки исследуемого пентода.

На передней панели стенда установлены два коаксиальных разъема X1 и X2. Через разъем X1 подаются входные сигналы (воздействия) в сеточные цепи исследуемых ламп. С разъема X2 снимаются сигналы анодной цепи исследуемых ламп.

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Ознакомиться с органами управления стенда и назначением измерительных приборов на передней панели стенда.

2. Ознакомиться с пределами измерений, классом точности количеством делений на шкале каждого прибора**.** Данные приборов занести в таблицу 1.1

Для расчетов следует использовать расчетные формулы **цены деления** измерительного прибора, которая определяется по формуле

$$Ц_{дел} = \frac{П_{изм}}{n}, \quad (1.1)$$

где $П_{изм}$ – предел измерения прибора, а n – количество делений на шкале,

класса точности (приведенной погрешности) которая определяется по формуле

$$\delta = \frac{\Delta A}{П_{изм}}, \quad (1.1)$$

где ΔА – абсолютная погрешность измерительного прибора,

абсолютной погрешности, которая определяется по формуле

$$\Delta A = A_{изм} - A_{ист} \quad (1.1)$$

где $A_{изм}$ – измеренная величина, $A_{ист}$ – истинное значение измеренной величины.

Таблица 1.1 – Параметры и характеристики измерительных приборов стенда

Наименование измерительного прибора	Предел измерения, В(мА)	Класс точности прибора, %	Цена деления измерительного прибора, В(мА)	Абсолютная погрешность измерительного прибора, В(мА)
Вольтметр, измеряющий анодное напряжение				
Вольтметр, измеряющий сеточное напряжение				
Миллиамперметр, измеряющий анодный ток				

3. Установить регулятор анодного напряжения (резистор R3) в крайнее левое положение. Установить регулятор сеточного напряжения (резистор R2) в крайнее левое положение. Убедится в том, что все клавиши выключателя S1 отжаты. Установить переключатель S5 в нижнее по схеме положение. Переключатели S2, S3, S5 могут находиться в любом положении. Подать напряжение питающей сети на стенд и включить его с помощью сетевого

выключателя. При включении должен загореться индикаторный светодиод над сетевым выключателем.

4. Переводя ручку регулятора анодного напряжения из крайнего левого положения в крайнее правое положение измерить диапазон регулирования изменения анодных напряжений. Результаты измерений занести в таблицу 1.2. Установить регулятор анодного напряжения (резистор R3) в крайнее левое положение.

5. Аналогичные действия произвести для измерения диапазона изменений сеточных напряжений**.** Результаты измерений занести в таблицу 1.2. Установить регулятор сеточного напряжения (резистор R2) в крайнее левое положение.

При проведении измерений не допускать зашкаливания (превышение предела измерения) стрелок измерительных приборов для избежания их порчи.

6. Определить величину сопротивления нагрузки анодной цепи электровакуумных приборов. Для этого установить величину анодного напряжения Ea = 150В и величину сеточного напряжения Ec = 0В, установить переключатель S3 в нижнее положение (измерения анодного напряжения), установить переключатель S2 в нижнее положение и нажав вторую клавишу переключателя S1 произвести отсчет значения величин анодного напряжения и тока. Рассчитать величину сопротивления анодной нагрузки

$$R_A = \frac{E_A - U_A}{I_A} \qquad (1.1)$$

Перевести переключатель S2 в верхнее (замкнутое) положение и повторить измерения и расчет. Результаты расчета занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Числовые характеристики источников анодного и сеточного напряжений

Наименование измеряемых параметров	Предел измерения прибора, В	Минимальное значение параметра, В	Максимальное значение параметра, В
Анодное напряжение			
Сеточное напряжение			
Сопротивление нагрузки анодной цепи	-		

Запрещается длительное время оставлять стенд в режимах больших анодных токов и положительных сеточных напряжений на время более 30сек.

7. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

8. В связи с тем, что в стенде используются высокие напряжения опасные

для жизни человека, **студентам запрещается самостоятельно производить ремонтные работы лабораторного стенда в случае его неисправности. В подобных случаях все вопросы, связанные с неисправностью лабораторного оборудования решают преподаватели, которые проводят лабораторный практикум.**

1.5 В отчет вносят:

- тему и цель работы;
- принципиальную схему стенда;
- результаты измерения напряжения питания анодной и сеточной цепи электровакуумных приборов;
- результаты расчетов параметров измерительных приборов;
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Сколько источников напряжений находится в стенде, и какие цепи они питают.
2. Укажите диапазон изменения напряжений питающих анодные цепи электровакуумных приборов.
3. Укажите диапазон изменения напряжений питающих сеточные цепи электровакуумных приборов.
4. Какая погрешность определяет класс точности прибора?
5. Каким образом определить абсолютную погрешность измерения, зная класс точности прибора?
6. В каких пределах можно изменять сопротивление нагрузки в анодной цепи?

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ДИОДА

1.1 **Цель работы:** изучить принцип действия и явления токопереноса в электровакуумном диоде, влияния пространственного заряда на характеристики диода.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для построения вольтамперных характеристик электровакуумного диода при различных напряжениях накала катода.

1.3 Краткие теоретические сведения:

Вакуумный диод является простейшим электронным прибором и обычно представляет собой коаксиальные цилиндрические электроды: накаливаемый катод и анод, помещенные в вакуумную колбу. Катод при нагревании эмитирует электроны, которые движутся к аноду при подаче на него положительного напряжения, таким образом, возникает анодный ток *Ia*. Эмитированные катодом электроны движутся в вакуумном промежутке, где, в отличие от других сред, они не сталкиваются с тяжелыми частицами, т.е. отсутствуют силы трения, препятствующие свободному движению электронов.

Если к аноду приложить ускоряющее электроны, положительное напряжение *Ua* , то анодный ток *I* не возрастает скачком до максимального значения *Im* , а плавно нарастает от нуля до *Im* . После этого рост тока прекращается, т.е. на вольтамперной характеристике (ВАХ) диода *Ia=f*(*Ua*) наблюдаются участки роста и насыщения. Токи на этих участках определяются разными физическими механизмами, которые изучаются в данной работе.

Рассмотрим сначала растущую часть ВАХ. Для простоты считаем электроды плоскими и достаточно большими, чтобы можно было пренебречь краевыми эффектами. Тогда, в отсутствие тока, т.е. зарядов в межэлектродном промежутке, потенциал φ растет линейно от катода к аноду (прямая 1 на рисунке 2.1).

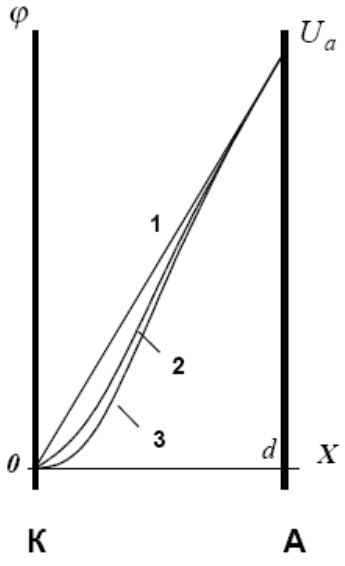


Рисунок 2.1

Вследствие термоэмиссии, электроны с поверхности катода попадают в межэлектродный промежуток, где возникает объемный заряд электронов плотностью **ρ** . Согласно уравнению Пуассона

$$-\nabla^2\varphi = -\rho/\varepsilon_0, \tag{2.1}$$

(ε - электрическая постоянная) этот заряд создает распределение потенциала, которое искажает исходное распределение в отсутствие тока (кривая 2 на рисунке 2.1). С увеличением тока эмиссии возрастает объемный заряд, и поле искажается сильнее (кривая 3 на рисунке 2.1). Таким образом, эмитированные катодом электроны движутся в суммарном электрическом поле, задаваемом электродами и собственным объемным зарядом электронов. Оно описывается уравнением (2.1) и ограничивает величину тока, протекающего через диод.

Пренебрегая тепловым разбросом скоростей эмитированных электронов, т.е. полагаем, что все электроны движутся с одинаковой скоростью *U* от катода к аноду. Распределение поля и заряда не меняется со временем ($d\rho/dt=0$), поэтому в силу уравнения непрерывности

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot\boldsymbol{j} = 0, \tag{2.2}$$

$dx\ dj=0$, т.е. $j = enu = \rho\ u = const$ по оси ***X***. Поскольку электроны все время движутся в ускоряющем поле, их скорость возрастает, а плотность, вследствие сохранения *j* – падает. Следовательно, поле электродов искажается, в основном, вблизи катода, где поле объемного заряда является основным, причем с увеличением потенциала анода, область влияния заряда уменьшается, а ток возрастает. Найдем распределение потенциала в межэлектродном промежутке, определяемое пространственным зарядом согласно уравнению (2.1), которое преобразуем следующим образом:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} = \frac{j}{u\varepsilon_0} = \frac{j}{(2e\varphi/m)^{1/2}\varepsilon_0} = Aj\varphi^{-1/2}, \tag{2.3}$$

где $A = (2e/m)^{-1/2}\varepsilon_0^{-1}$.

Граничные условия для уравнения (2.2):

$$\varphi(x=0) = 0, \qquad \frac{d\varphi}{dx}(x=0) = 0 \tag{2.4}$$

Первое граничное условие – очевидно, второе условие определяется тем, что в пренебрежении тепловым разбросом скоростей эмитированных катодом

электронов, при $\frac{d\varphi}{dx}(x=0)>0$ они все попадают на анод независимо от *Ua* , а при при $\frac{d\varphi}{dx}(x=0)<0$ все возвращаются на катод тормозящим полем опять-таки независимо от *U a*. Оба этих результата противоречат опыту, поэтому остается предположить вид (2.4) граничных условий задачи. В реальных условиях второе граничное условие (2.4) выполняется при *x* ≤0,1мм, таким образом, являясь хорошим приближением. Дважды интегрируя уравнение (2.3) с граничными условиями (2.4), получаем

$$j=\frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{\varphi^{3/2}}{x^2}. \tag{2.5}$$

Если расстояние между электродами равно *d*, а напряжение - *Ua* , то формула (2.5) примет вид

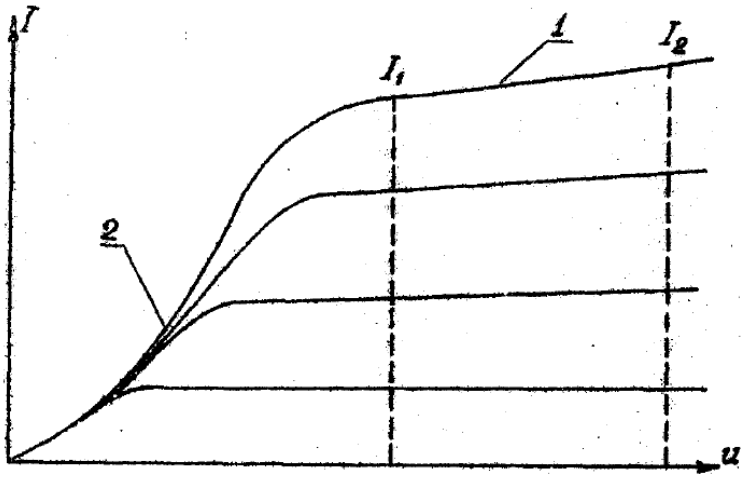
$$j=\frac{4}{9}\varepsilon_0\left(\frac{2e}{m}\right)^{1/2}\frac{U^{3/2}}{d^2}\ . \tag{2.6}$$

Выражение (2.6) носит название закона Ленгмюра (закон «трех вторых») и связывает плотность тока и анодное напряжение диода при заданном расстоянии между электродами *d*.

Для диода с коаксиальными электродами, если радиус анода много больше радиуса катода зависимость тока I от напряжения U описывается выражением

$$I=\frac{2\sqrt{2}}{9}\sqrt{\frac{e}{m}}\frac{l}{ra}U^{3/2} \tag{2.7}$$

График зависимости анодного тока от напряжения на аноде диода представлен на рисунке 2.2.



1 – эффект Шотки, 2 – «закон 3/2»

Рисунок 2.3 – Вольтамперные характеристики электровакуумного диода при различных температурах катода

В эксперименте наблюдаются отклонения от закона Ленгмюра как при малых, так и при больших значениях *Ua* . В первом случае они связаны с влиянием начальных тепловых скоростей электронов, а также с наличием потенциала, распределенного вдоль катода, вследствие приложенного к его концам напряжения накала. Во втором случае отклонения от закона Ленгмюра связаны с переходом к участку насыщения ВАХ. Таким образом, ток на растущей части ВАХ диода определяется действием объемного заряда электронов и заведомо меньше тока термоэлектронной эмиссии катода.

При достаточно высоких анодных напряжениях анодный ток достигает насыщения – все эмитируемые электроны попадают на анод.

Если анодное напряжение достигает величины насыщения $Ua_{нас}$ анодный ток становится равным эмиссионному току, и зависит только от температуры и площади катода эта зависимость описывается формулой Ричардсона - Дэшмана

$$j = AT^2 \exp(-\varphi / kT). \qquad (2.8)$$

где j – плотность тока эмиссии (отношение тока эмиссии к площади катода), T – температура катода, φ – работа выхода электрона, k – постоянная Больцмана.

В режиме насыщения анодный ток не остается постоянным и растет с увеличением анодного напряжения. Это происходит вследствие эффекта Шотки – влияние внешнего электрического поля на работу выхода электрона. При наличии внешнего электрического поля потенциальный барьер на границе металл – вакуум становится конечной, а его величина несколько понижается. Понижение высоты потенциального барьера, т.е. снижение работы выхода электронов равна $\Delta\varphi=e^{3/2}E^{1/2}$, где E – напряженность электрического поля у катода. Напряженность поля E рассчитывается по формуле

$$E = U / r_K \ln(r_a / r_K) \qquad (2.9)$$

где r_a – радиус анода, $r_к$ – радиус катода.

Режим насыщения соответствует максимальному значению анодного тока при заданной температуре катода. Зная электрические параметры цепи накала катода можно рассчитать эффективность катода исследуемого диода

$$H = \frac{I_{к\,max}}{I_н U_н}. \qquad (2.10)$$

При работе диодов в цепях постоянного тока интерес представляет такой параметр диода как сопротивление его постоянному току

$$R_0 = \frac{U_a}{I_a}. \qquad (2.11)$$

При работе диодов в цепях постоянного тока используется такой параметр как дифференциальное сопротивление Ri, которое находится как

$$Ri = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \qquad (2.12)$$

Из этих двух формул явно видно, что сопротивления R_0 и Ri существенно отличаются на начальном участке и участке насыщения.
Дифференциальное сопротивление диода связано с крутизной вольтамперной характеристики следующим соотношением

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{1}{Ri} \qquad (2.13)$$

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Подготовить к работе лабораторный стенд. Установить регуляторы анодного и сеточного напряжений в крайнее левое положение. Убедиться (не включая стенд) что стрелка миллиамперметра измеряющего анодные токи электровакуумных приборов находится точно на отметке «0». Установить переключатели S2 и S5 в нижнее положение. Положение переключатели S3 значения не имеет. Подать напряжение питающей сети и включить стенд с помощью выключателя «Сеть». При включении должен загореться индикаторный светодиод над включателем.
2. Нажать левую клавишу переключателя S1 на передней панели стенда, что даст возможность исследовать электровакуумный диод.

3. От внешнего источника питания запитать цепь накала исследуемого диода. Установить напряжение накала 2 В. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут.

4. Изменяя напряжение на аноде диода от 0 В до 100 В (через 10В), и фиксируя при этом величину анодного тока, снять вольтамперную характеристику (ВАХ) диода. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерения ВАХ диода

№ п/п	Анодное напр-ние, В	Анод-й ток, мА	Напр-ние накала, В	Ток накала, мА	Крутизна ВАХ, мА/В	Сопр-е пост. току, кОм	Дифф-е сопр-е, кОм	Эффективность катода, мА/Вт
1	0		3					
….	….		3					
100	100		3					
1	0		4					
….	….		4					
100	100		4					
1	0		5					
….	….		5					
100	100		5					

После окончания измерений установить регулятор анодного напряжения в крайнее левое положение.

5. Установить напряжение накала 2,5 В. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут. Повторить действия указанные в п4.

6. Установить напряжение накала 3 В. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут. Повторить действия указанные в п4.

6. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

7. Построить семейство вольтамперных характеристик для всех напряжений накала катода.

8. На отдельном графике построить начальный нелинейный участок ВАХ в координатах $I(U_a^{3/2})$

9. По результатам измерений рассчитать следующие характеристики электровакуумного диода: внутреннее сопротивление диода постоянному току, дифференциальное сопротивление, крутизну вольтамперной характеристики, эффективность катода.

1.5 В отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения анодных токов и напряжений, а также напряжений и токов цепи накала электровакуумных приборов;
- результаты расчетов параметров электровакуумного диода;
- графики вольтамперных характеристик диода при различных напряжениях накала катода;
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Понятие вакуума и электровакуумных приборов.
2. Какие физические процессы происходят при термоэлектронной эмиссии
3. Физическое понятие работы выхода электрона.
4. Классификация катодов.
5. Параметры катода и от чего зависит эффективность катода?
6. Что такое задерживающий потенциал?
7. Как зависит ток термоэмиссии от задерживающего потенциала?
8. Что такое поле объемного заряда?
9. Физический смысл эффекта Шотки
10. Что описывает закон Ленгмюра (закон степени 3/2)?
11. От каких параметров электровакуумного диода зависит крутизна его ВАХ?
12. От каких параметров электровакуумного диода зависит его внутреннее сопротивление постоянному току?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ТРИОДА

1.1 Цель работы: изучить принцип действия и характеристики в электровакуумного триода.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для построения семейства вольтамперных характеристик электровакуумного триода при различных напряжениях на его управляющей сетке.

1.3 Краткие теоретические сведения:

Триод - это электровакуумный прибор, содержащий три электрода: катод, анод и между ними третий электрод, называемый сеткой.

Процесс выхода электронов из тела называют электронной эмиссией. Для того, чтобы электрон вышел из тела ему необходимо сообщить дополнительную энергию. И в зависимости от вида дополнительной энергии различают термоэлектронную, вторичную электронную эмиссию и др. В лампах наибольше распространение получила термоэлектронная эмиссия.

Катод – это электрод, который при нагреве испускает электроны. По конструктивному признаку катоды можно разделить на две группы: катоды прямого накала и косвенного. В первом случае ток накала *Iн* протекает непосредственно по телу катода. В катодах косвенного накала подогреватель и собственно катод разделяются изолятором, который обладает хорошей теплопроводностью. Преимущество катодов косвенного накала перед катодами прямого накала заключается в возможности их питания переменным током. Это значительно упрощает схемы источников напряжения накала.

Анод – является коллектором, т.е. электродом, который собирает электроны. Анод в соответствии с формой катода выполняется либо в виде цилиндра, либо в виде короба.

Сетка - позволяет осуществлять управление анодным током триода, поэтому ее называют управляющей сеткой. Она выполняется в виде спирали из тонкой проволоки, располагается между катодом и анодом, ближе к поверхности катода.

Принцип действия триода.

Потенциал катода обычно принимают равным нулю(*U*к=0), на анод подается положительное напряжение, а на сетку лампы может быть подано как положительное, так и отрицательное напряжение. При нагреве катода током накала *Iн* возникает термоэлектронная эмиссия. Электроны скапливаются у катода в виде электронного облака и под влиянием положительного напряжения анода устремляются к нему. При этом появляется анодный ток *I*а, направленный во внешней цепи от катода к аноду. Следует отметить, что на электроны покинувшие катод и находящиеся в вакуумном объеме лампы действует совокупность сил электрических полей, которые образуются приложенными напряжениями к электродам лампы (сетке и аноду). Таким образом, на электрон в триоде действуют силы двух полей – положительного (ускоряющего или притягивающего) поля анода и

поля сетки, которое может быть как ускоряющим – при положительном напряжении на ней, так и тормозящим – при отрицательном напряжении.

Сила, с которой поле действует на электрон, определяется по формуле

$$F = - e E = -eU/d \qquad (3.1)$$

где e – заряд электрона равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а E = U/d– напряженность поля, которая зависит от величины приложенного напряжения и расстояния между электродами.

Поскольку сетка лампы располагается к катоду на много ближе чем анод, следовательно, влияние ее поля на термоэлектроны на много значительнее, чем поля анода. Из этого следует, что незначительные изменения напряжения на сетке триода приводят к значительным изменениям тока анодной цепи.

Изменение напряжения на сетке сильно влияет на электрическое поле в пространстве катод-сетка и слабее на поле между сеткой и анодом.

Рассмотрим влияние сетки на работу триода.

1) Uc <= 0; Ia1 > 0; Ic = 0 (рисунок 3.1)

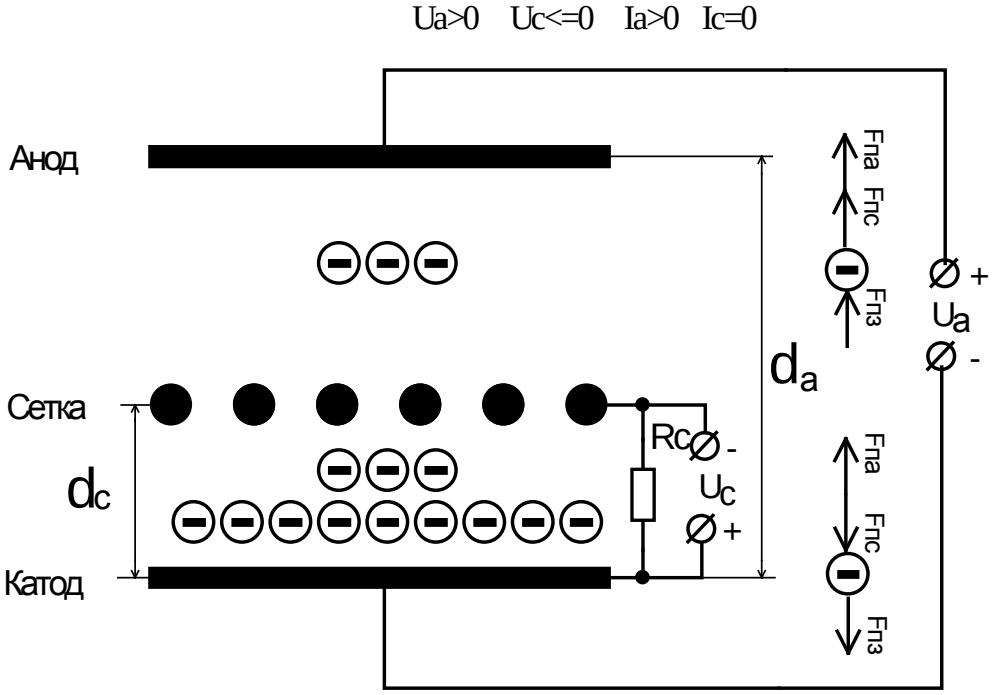


Рисунок 3.1

Следовательно, при напряжении на сетке, равном нулю, сетка не оказывает воздействия на поле анода, и в цепи анода будет протекать ток.

2) Uc > 0; Ia2 > Ia1; Ic > 0. (рисунок 3.2)

Ua>0 Uc>0 Ia>0 Ic>0

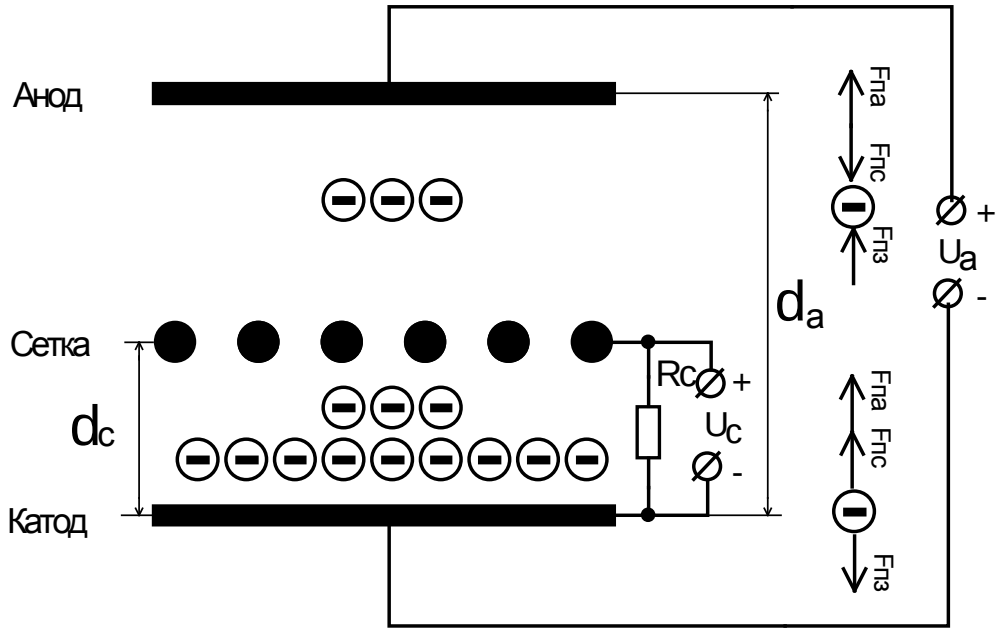


Рисунок 3.2

При положительных напряжениях на сетке между нею и катодом возникает поле сетки, линии, напряжённости которого направлены так же, как и у анода. Результирующее действие поля на электроны усиливается, и ток анода возрастает. Следовательно, положительно заряженная сетка перехватывает часть электронов, за счёт чего возникает ток сетки Ic.

3) Uc << 0; Ia3=0. (рисунок 3.3)

Ua>0 Uc<<0 Ia=0 Ic=0

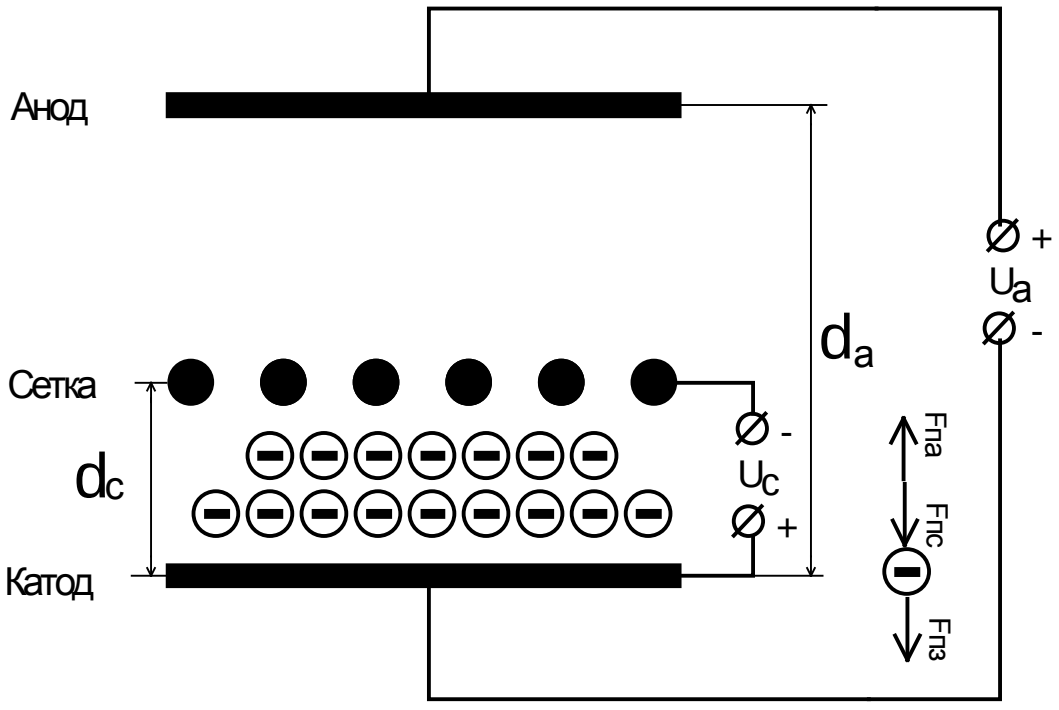


Рисунок 3.3

При подаче отрицательного напряжения на сетку поле сетки будет противодействовать полю анода, за счёт чего анодный ток уменьшается.

При достаточно большом отрицательном напряжении на сетке в пространстве катод – сетка тормозящее поле создается не только вблизи витков сетки, но и между ними. Поэтому электроны, покидающие катод не могут преодолеть действие тормозящего поля и возвращаются к катоду. В результате объемный отрицательный заряд и потенциал в пространстве между катодом и сеткой становится еще более отрицательным. Электроны не достигают анода, и анодный ток *I*а=0. Напряжение управляющей сетки, при котором *I*а=0 называется напряжением запирания лампы *Uзап* или напряжением отсечки *Uотс*. Уменьшение отрицательного напряжения на сетке приводит к уменьшению тормозящего поля и тогда все большее число электронов способны достичь анода. При подаче положительного напряжения большая часть электронов устремляется к аноду и создает анодный ток, но электроны, движущиеся вблизи витков сетки, притягиваются к ней и образуют сеточный ток *I*с. Таким образом, при *U*с>0 поток электронов, движущихся от катода и образующий катодный ток *I*к, разветвляется на два потока, создающих сеточный и анодный токи.

$$I_к = I_с + I_а \qquad (3.2)$$

Так как площадь витков намного меньше площади анода, то *I*с << *I*а.

Триод имеет два семейства вольтамперных характеристик:

Анодные (выходные) - зависимость силы тока в анодной цепи триода от величины напряжения на аноде при постоянном напряжении на сетке лампы.

Анодно-сеточные (проходные) - зависимость силы тока в анодной цепи триода от величины напряжения на сетке лампы при постоянном напряжении на аноде триода.

На рис. 3.4 приведены анодно-сеточные характеристики $I_A = f(U_C)$ для триода.

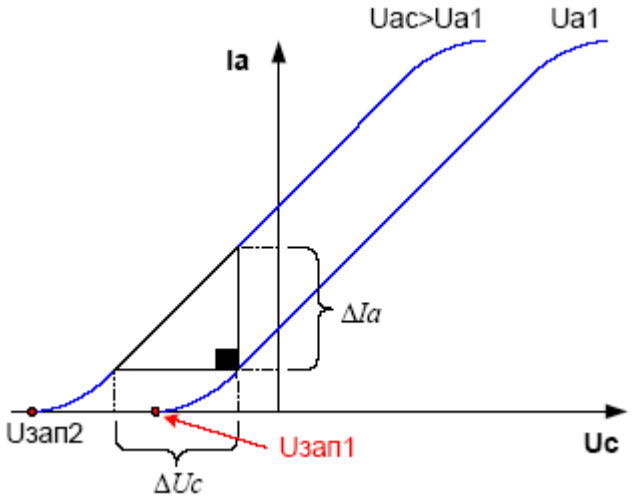


Рисунок 3.4 – Анодно-сеточные характеристики триода

На рис. 3.5 приведены анодные характеристики $I_A = f(U_A)$ для триода.

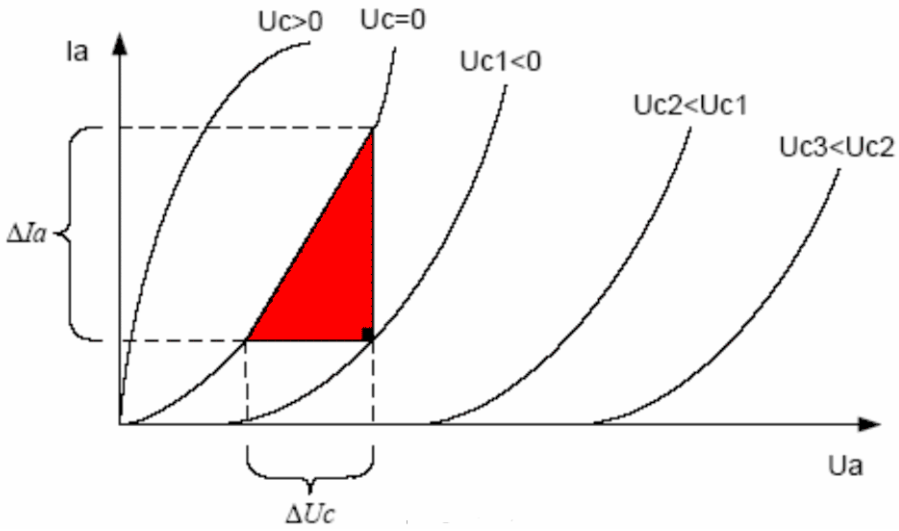


Рисунок 3.5 - Анодные характеристики триода

Для оценки качества лампы используются статические параметры лампы. Статические параметры отражают интересующую зависимость обычно в одной (рабочей) точке при заданном режиме работы лампы.

Основные статические параметры триода:

крутизна проходной характеристики

$$S = \frac{dI_a}{dU_{C1}}\Big|U_a = const \tag{3.3}$$

внутреннее сопротивление лампы по переменному току (дифференциальное сопротивление)

$$R_i = \frac{dU_a}{dI_a}\Big|U_{C1} = const \tag{3.4}$$

сопротивление лампы постоянному току

$$R0 = Ua / Ia \tag{3.5}$$

коэффициент усиления

$$\mu = \Delta U_A / \Delta U_C \tag{3.6}$$

проницаемость триода

$$Д = 1/\mu = \Delta U_C / \Delta U_A \tag{3.7}$$

Произведение $SRi = \mu$ называется внутренним уравнением триода.

В триоде имеется три междуэлектродные емкости (рисунок 3.6) *С*ск – создает реактивную проводимость во входной цепи – называют входной емкостью, *С*ак – создает реактивную проводимость в выходной цепи – выходной емкостью, емкость анод-сетка *С*са создает связь между входными и выходными цепями лампы – поэтому ее называют проходной емкостью.

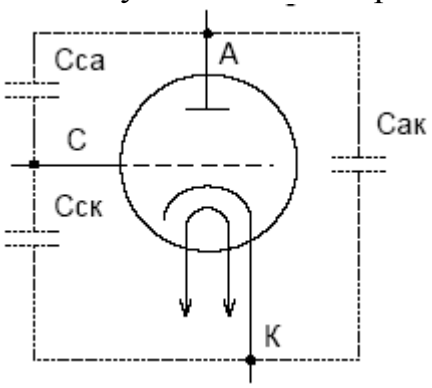


Рисунок 3.6 – Междуэлектродные емкости в триоде

Проходная емкость оказывает наиболее сильное влияние на свойства триода на высоких частотах, так как через нее протекает переменный ток из выходной цепи во входную, т.е. имеет место обратная связь (ОС). С увеличением частоты сопротивление емкости *С*ас становится малым и в результате прохождения высокочастотного сигнала ламповый усилитель может превратиться в генератор незатухающих колебаний (режим самовозбуждения).

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Подготовить к работе лабораторный стенд. Установить регуляторы анодного и сеточного напряжений в левое положение. Убедиться (не включая стенд) что стрелка миллиамперметра измеряющего анодные токи электровакуумных приборов находится точно на отметке «0». Установить переключатели S2 в верхнее положение, а переключатель S5 в нижнее положение. Переключатель S3 установить в нижнее положение. Подать напряжение питающей сети и включить стенд с помощью выключателя «Сеть». При включении должен загореться индикаторный светодиод над включателем.
2. Нажать вторую клавишу переключателя S1 (счет ведется слева на право) на передней панели стенда, что даст возможность исследовать электровакуумный триод.
3. От внутреннего источника питания запитать цепь накала исследуемого триода. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут. Установить напряжение на сетке триода -6В.
4. Изменяя напряжение на аноде триода от 0В до 100В через 10В, и фиксируя при этом величину анодного тока, снять анодную (выходную) вольтамперную характеристику (ВАХ) триода. **Внимание !!! Величина анодного тока не должна превышать предела измерения миллиамперметра.** Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты измерения анодной (выходной) ВАХ триода

№п/п	Напряжение сетки, В	Анодное напряжение Ua, В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление постоянному току триода Ro, кОм	Дифференциальное сопротивление триода Ri, кОм
1	+1	0			
….	+1	….			
10	+1	100			
1	-3	0			
….	-3	….			
10	-3	100			
1	-6	0			
….	-6	….			
10	-6	100			

После окончания измерений установить регулятор анодного напряжения в крайнее левое положение.

5. Установить напряжение сетки (-3 В). Повторить действия указанные в п4.

6. Установить напряжение сетки (+1В). Повторить действия указанные в п4.

6. Построить семейство вольтамперных характеристик для всех сеточных напряжений триода.

7. Установить напряжение на сетке триода (-8 В), и напряжение на аноде 50В.

8. Изменяя напряжение на сетке триода от (-8 В), до +1В (через 1 В), и фиксируя при этом величину анодного тока, снять анодно-сеточную (проходную) вольтамперную характеристику (ВАХ) триода. Результаты измерений занести в таблицу 3.2. Аналогичные действия произвести при величинах анодного напряжения 100В и 150В.

Таблица 3.2 – Результаты измерения анодно-сеточной (проходной) ВАХ триода

№п/п	Анодное напряжение Ua,В	Напряжение сетки Uc,В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление постоянному току триода Ro, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Дифференци-альное сопротивление триода Ri, кОм
1	+50	-8				
….	+50	….				
10	+50	+1				
1	+100	-8				
….	+100	….				
10	+100	+1				
1	+150	-8				
….	+150	….				
10	+150	+1				

9. Отжать все клавиши переключателя S1 и установить величину напряжения питания анодной цепи триода Ea=150В. Нажать вторую клавишу переключателя S1 (счет ведется слева на право) на передней панели стенда. Установить напряжение на сетке триода -2В, и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного триода. Результаты измерения занести в таблицу 3.3 Установить напряжение на сетке триода +1 В, и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного триода. Результаты измерения занести в таблицу 3.3

10. Перевести переключатель S2 в нижнее положение. Установить напряжение на сетке триода (-2 В), и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного триода. Результаты измерения занести в таблицу 3.3 Установить напряжение на сетке триода (+1 В), и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного триода. Результаты измерения занести в таблицу 3.3

Таблица 3.3 – Результаты измерения коэффициента усиления триода

№п/п	Анодное напряжение Ua, В	Напряжение сетки, В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление нагрузки триода Rн, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Коэффициент. усиления μ	Положение переключателя S2
1		-2					Вверх
2		+1					
3		-2					Вниз
4		+1					

11. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

12. По результатам измерений рассчитать следующие характеристики электровакуумного триода: внутреннее сопротивление триода постоянному току, дифференциальное сопротивление, крутизну вольтамперной характеристики, проницаемость триода и коэффициент усиления, напряжение отсечки.

1.5 В отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения анодных токов и напряжений;
- результаты расчетов параметров электровакуумного триода;
-графики семейств вольтамперных (анодных и анодно-сеточных) характеристик триода;
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Поля, каких электродов действуют на электронный поток в триоде?
2. Назначение управляющей сетки в триоде.
3. Причина сильного влияния сеточного напряжения на силу анодного тока.
3. Статические характеристики триода.
5. Зависимость статических параметров от положения рабочей точки. Определение их по характеристикам.
6. Какая из междуэлектродных емкостей триода сильнее всего влияет на работу триода в области высоких частот?
7. Что такое напряжение отсечки триода?
8. Как изменяется величина напряжения отсечки при изменении анодного напряжения триода?
9. Недостатки триодов.
10. Классификация триодов.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА

1.1 Цель работы: изучить принцип действия и характеристики в электровакуумного пентода.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для построения семейства вольтамперных характеристик электровакуумного пентода при различных напряжениях на его управляющей сетке.

1.3 Краткие теоретические сведения:

Пентод - это электровакуумный прибор, содержащий пять электродов: катод, анод и между ними три электрода, называемые сетками.

Процесс выхода электронов из тела называют электронной эмиссией. Этот процесс описан в теоретических сведениях предыдущих работ.

Назначения катода и анода пентода также описаны в теоретических сведениях предыдущих работ.

Сетки в пентоде позволяют осуществлять управление анодным током пентода, и уменьшают его проходную емкость. Они выполняются в виде спирали из тонкой проволоки, располагается между катодом и анодом.

Принцип действия пентода.

Потенциал катода обычно принимают равным нулю(Uк=0), на анод подается положительное напряжение, а на управляющую (первую) сетку лампы может быть подано как положительное, так и отрицательное напряжение. Для уменьшения величины проходной емкости лампы (Сса) в состав пентода введены две дополнительные сетки – экранная и антидинатронная (защитная). Экранирующая сетка по своей конструкции аналогична управляющей сетке в триоде, но шаг ее спирали обычно меньше. На экранирующую сетку подается положительное напряжение, равное обычно 60-100% величины анодного напряжения. Т.к. в этой лампе положительный потенциал имеет не только анод, но и экранирующая сетка, то на электронный поток, движущийся от катода к аноду, влияют поля трех электродов. В результате чего ток катода всегда разветвляется на два: поток электронов, направляющийся к аноду, и поток электронов, попадающий на экранирующую сетку. Поскольку управляющая сетка ламп, как правило, работает в области отрицательных напряжений

$$I\text{к} = I\text{c}_2 + I\text{a} \qquad (4.1)$$

Так как площадь витков экранной сетки намного меньше площади анода, то $I\text{c}_2 << I\text{a}$.

Пентод также как и триод имеет два семейства вольтамперных характеристик:

Анодные (выходные) - зависимость силы тока в анодной цепи триода от величины напряжения на аноде при постоянном напряжении на сетках лампы.

Анодно-сеточные (проходные) - зависимость силы тока в анодной цепи триода от величины напряжения на сетке лампы при постоянном напряжении на аноде и экранирующей сетке пентода.

На рис. 4.1 приведена анодная характеристика пентода

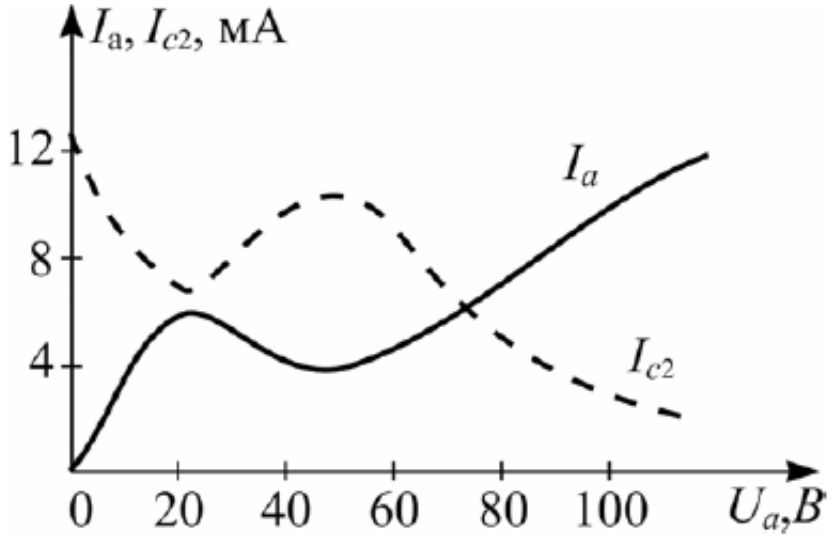


Рисунок 4.1

Аномальный вид анодной характеристики пентода (рис.4.1) объясняется возникновением вторичной эмиссии с поверхности анода при $U_A \geq 20B$. Энергия электронов, достигающих анода, оказывается достаточной для выбивания с его поверхности вторичных электронов. Эти электроны под действием более высокого напряжения U_{C2} попадают на экранирующую сетку, и вызывает увеличение тока I_{C2}. Анодный ток уменьшается, образуется падающий участок характеристики, соответствующий отрицательному дифференциальному увеличению анодного напряжения Uа. При увеличении анодного напряжения анодный ток Iа снова начинает расти, а сеточный I_{C2} уменьшаться т.к. все большая часть электронов возвращается обратно на анод. Это влияние вторичной электронной эмиссии получило название динатронного эффекта. Как видно из графиков из-за этого эффекта пентод нельзя использовать при малых анодных напряжениях. Зависимость тока второй сетки $I_{C2} = f(U_A)$ приведена на рис.4.1 (пунктир). Для устранения динатронного эффекта между анодом и второй сеткой установлена третья защитная (антидинатронная) сетка. Это довольно редкая сетка, соединенная с катодом, имеет относительно нулевой потенциал. Она создает потенциальный барьер между анодом и экранирующей сеткой, препятствующий движению вторичных электронов с анода. Введение защитной сетки в лампу значительно улучшает статические параметры пентода.

Пентоды обладают очень большим коэффициентом усиления, (до нескольких тысяч), большим внутренним сопротивлением и малой проходной емкостью. Для анодных характеристик пентода типичны два участка: крутой начальный участок, соответствующий режиму возврата электронов, и пологий рабочий участок режима прямого перехвата.

На рис. 4.2 приведены анодно-сеточные характеристики $I_A = f(U_C)$ пентода.

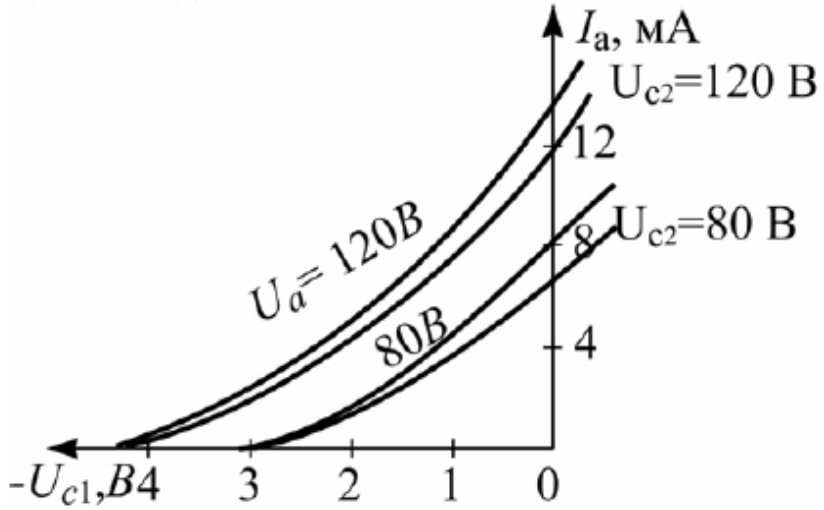


Рисунок 4.2 - Анодно-сеточные характеристики пентода 6Ж2П

На рис. 4.3 приведены анодные характеристики $I_A = f(U_A)$ для пентода.

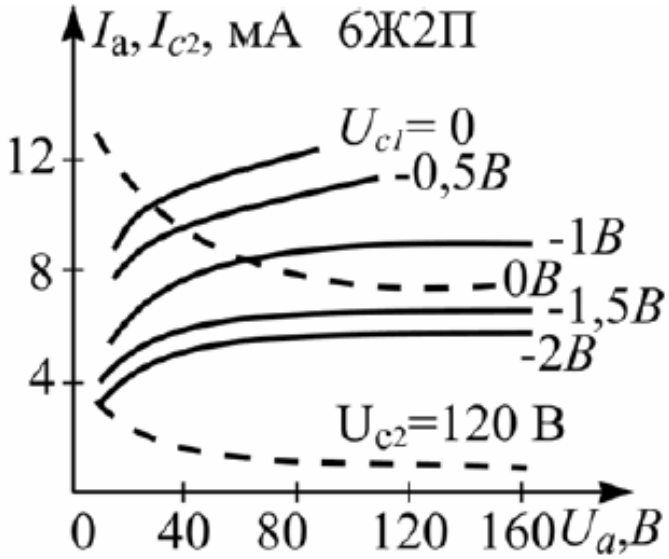


Рисунок 4.3 - Анодные характеристики пентода 6Ж2П

Для оценки качества лампы используются статические параметры лампы. Статические параметры отражают интересующую зависимость обычно в одной (рабочей) точке при заданном режиме работы лампы.

Основные статические параметры пентода:
крутизна проходной характеристики

$$S = \frac{dI_A}{dU_{C1}}; при Ua и Uc_2 = const \qquad (4.2)$$

внутреннее сопротивление лампы по переменному току (дифференциальное сопротивление)

$$Ri = \frac{dU_A}{dI_A}; при\ Uc_1\ и\ Uc_2 = const \qquad (4.3)$$

сопротивление лампы постоянному току

$$R_0 = Ua / Ia \qquad (4.4)$$

коэффициент усиления

$$\mu = \Delta U_A / \Delta U_{C1} \qquad (4.5)$$

проницаемость пентода

$$Д = 1/\ \mu = \Delta U_{C1} / \Delta U_A \qquad (4.6)$$

Условно графическое обозначение пентода представлено на рисунке 4.5.

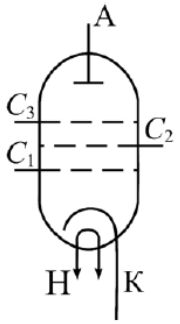
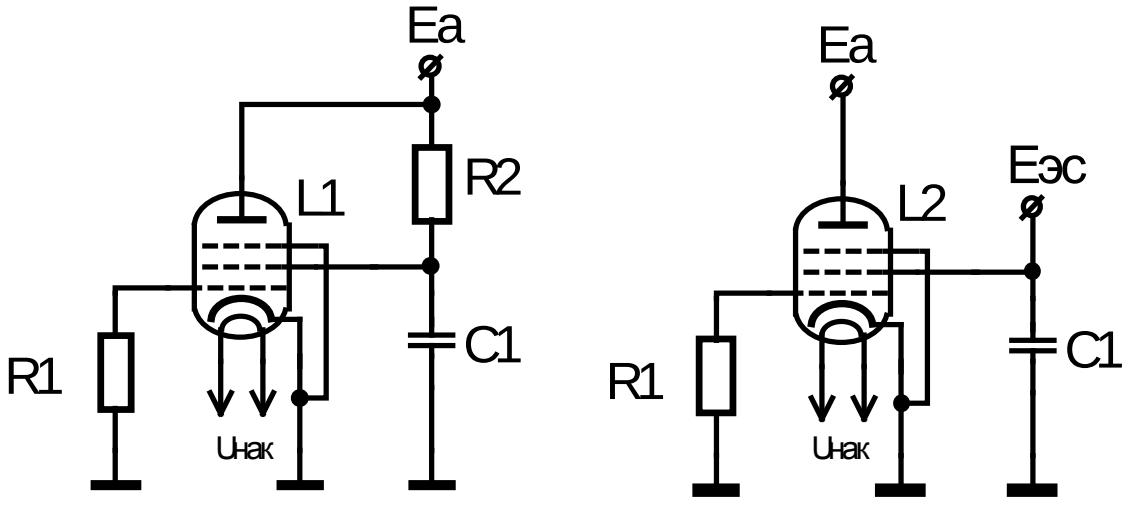


Рисунок 4.5 – Условно графическое обозначение пентода

Схемы цепей питающих экранную и антидинатронную (защитную) сетку показаны на рисунке 4.6



а б

а – питание от источника Ea, б - питание от внешнего источника

Рисунок 4.6 – Схемы питания экранной сетки пентода

Таким образом экранирующая сетка благодаря шунтирующему конденсатору С1 имеет всегда постоянный потенциал по постоянному току, а по переменному току всегда имеет потенциал «общего провода».

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Подготовить к работе лабораторный стенд. Установить регуляторы анодного и сеточного напряжений в левое положение. Убедиться (не включая стенд) что стрелка миллиамперметра измеряющего анодные токи электровакуумных приборов находится точно на отметке «0». Установить переключатели S2 в верхнее положение, а переключатель S5 в нижнее положение. Переключатель S3 установить в нижнее положение. Подать напряжение питающей сети и включить стенд с помощью выключателя «Сеть». При включении должен загореться индикаторный светодиод над включателем.
2. Нажать третью клавишу переключателя S1 (счет ведется слева на право) на передней панели стенда, что даст возможность исследовать электровакуумный пентод.
3. От внутреннего источника питания запитать цепь накала исследуемого пентода. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут. Установить напряжение на первой сетке пентода (-6 В).
4. Изменяя напряжение на аноде пентода от 0 В до 100В (через 10В), и фиксируя при этом величину анодного тока, снять анодную (выходную) вольтамперную характеристику (ВАХ) пентода. **Внимание !!! Величина анодного тока не должна превышать предела измерения миллиамперметра.** Результаты измерений занести в таблицу 4.1.
После окончания измерений установить регулятор анодного напряжения в крайнее левое положение.
5. Установить напряжение сетки (-3В). Повторить действия указанные в п4.
6. Установить напряжение сетки (+1В). Повторить действия указанные в п4.
7. Построить семейство выходных вольтамперных характеристик для всех сеточных напряжений пентода.

Таблица 4.1 – результаты измерения анодной (выходной) ВАХ пентода

№п/п	Напряжение первой сетки, В	Анодное напряжение Ua, В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление постоянному току пентода Ro, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Коэфф. усиления μ	Дифференциальное сопротивление пентода Ri, кОм
1	+1	0					
….	+1	….					
10	+1	100					
1	-3	0					
….	-3	….					
10	-3	100					
1	-6	0					
….	-6	….					
10	-6	100					

8. Установить напряжение сетке пентода-8В, а напряжение на аноде 50В.
9. Изменяя напряжение на сетке пентода от -8В до +1В через 1В, и фиксируя при этом величину анодного тока, снять анодно-сеточную (проходную) вольтамперную характеристику (ВАХ) пентода. Результаты измерений занести в таблицу 4.2. Аналогичные действия произвести при величинах анодного напряжения 100В и 150В.

Таблица 4.2 – Результаты измерения анодно-сеточной (проходной) ВАХ пентода

№п/п	Анодное напряжение Ua, В	Напряжение сетки, В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление постоянному току пентода Ro, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Коэфф. усиления μ	Дифференциальное сопротивление пентода Ri, кОм
1	+50	-8					
….	+50	….					
10	+50	+1					
1	+100	-8					
….	+100	….					
10	+100	+1					
1	+150	-8					
….	+150	….					
10	+150	+1					

10. Построить семейство проходных вольтамперных характеристик для всех анодных напряжений пентода.

11. Отжать все клавиши переключателя S1 и установить величину напряжения питания анодной цепи пентода Ea=150В. Нажать вторую клавишу переключателя S1 (счет ведется слева на право) на передней панели стенда. Установить напряжение на сетке пентода (-2 В), и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного пентода. Результаты измерения занести в таблицу 4.3. Установить напряжение на сетке триода +1В, и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного пентода. Результаты измерения занести в таблицу 4.3

12. Перевести переключатель S2 в нижнее положение. Установить напряжение на сетке пентода (-2 В), и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного пентода. Результаты измерения занести в таблицу 4.3. Установить напряжение на сетке пентода (+1 В), и произвести отсчет напряжение на аноде электровакуумного пентода. Результаты измерения занести в таблицу 4.3

Таблица 4.3 – Результаты измерения коэффициента усиления пентода

№п/п	Анодное напряжение Ua, В	Напряжение сетки, В	Анодный ток Ia, мА	Сопротивление нагрузки пентода Rн, кОм	Крутизна ВАХ S, мА/В	Коэффициент усиления μ	Положение переключателя S2
1		-2					Вверх
2		+1					
3		-2					Вниз
4		+1					

13. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

14. По результатам измерений рассчитать следующие характеристики электровакуумного пентода: внутреннее сопротивление пентода постоянному току, дифференциальное сопротивление, крутизну вольтамперной характеристики, проницаемость пентода и коэффициент усиления, напряжение отсечки.

1.5 Содержание отчета

в отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения анодных токов и напряжений;
- результаты расчетов параметров электровакуумного пентода;
-графики семейств вольтамперных (анодных и анодно-сеточных) характеристик пентода;
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Поля, каких электродов действуют на электронный поток в пентоде?
2. Назначение экранирующей сетки в пентоде.
3. Назначение защитной (антидинатронной) сетки в пентоде.
4. Причина появления динатронного эффекта в пентоде.
5. Статические характеристики пентода.
6. Зависимость статических параметров от положения рабочей точки. Определение их по характеристикам.
7. Какая из междуэлектродных емкостей пентода сильнее всего влияет на работу триода в области высоких частот?
8. Что такое напряжение отсечки пентода?
9. Как изменяется величина напряжения отсечки при изменении анодного напряжения пентода?
10. Классификация пентодов.
11. Почему коэффициент усиления пентода много выше чем у триода?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНОГО ПЕНТОДА

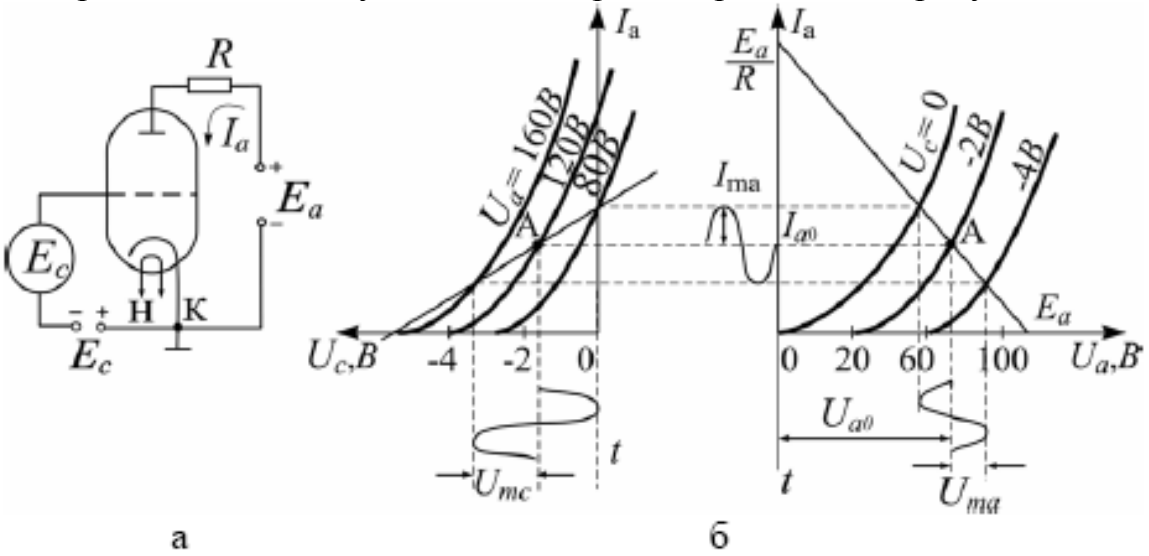
1.1 **Цель работы:** изучить принцип действия и характеристики усилительного каскада на основе электровакуумного пентода включенного по схеме с общим катодом.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для построения динамической характеристики каскада на основе электровакуумного пентода. Исследовать работу каскада в режиме класса А и в режиме класса В.

1.3 Краткие теоретические сведения: Электровакуумные приборы, имеющие в своем составе одну (триод) или несколько (тетрод, пентод) сеток предназначены в основном для усиления и генерирования электрических сигналов. Эти электровакуумные приборы могут быть использованы в следующих устройствах:

6. В каскадах усиления низкой частоты на сопротивлениях.
7. В фазоинверторах для поворота фазы напряжения при возбуждении последующего двухтактного каскада.
8. В оконечных каскадах, собранных по двухтактной схеме для усиления мощности.
9. В качестве отдельного гетеродина в приемниках, телевизорах и измерительной аппаратуре.
10. Для усиления колебаний высокой частоты в УКВ диапазоне.

Простейшая схема усилителя на триоде приведена на рисунке 5.1



а - принципиальная схема усилительного каскада на триоде, б – вольтамперные характеристики каскада

Рисунок 5.1

В зависимости от назначения каскада выбирается режим работы усилительного элемента (лампы). Лампа, включенная в усилительный каскад, может работать как в линейном, так и в импульсном режиме. Режим, в котором работает лампа усилительного каскада, определяется положением ее

рабочей точки. Рабочая точка лампы - это режим работы лампы при отсутствии входного сигнала, которое характеризуется начальным анодным током Ia_0, напряжением на аноде Ua_0, напряжением на управляющей сетке Uc_0 (рисунок 5.1, точка А).

Напряжение анода при наличии нагрузки R в анодной цепи определяется выражением

$$U_A = E_A - I_A R \qquad (5.1)$$

Эта зависимость называется нагрузочной характеристикой лампы (рисунок.5.1,*б*).

В зависимости от того, в каком месте нагрузочной прямой находится рабочая точка лампы, режим работы каскада может быть линейным (класс А) или импульсный (класс В).

Класс А - режим усиления, при котором анодный ток проходит через лампу в течение всего периода и форма переменной составляющей его является точным воспроизведением формы переменного напряжения, приложенного к управляющей сетке. Среди других классов усиления режим А самый неэкономичный; его к.п.д. составляет 15...20%, но этот режим обеспечивает наименьшие искажения входного сигнала. Это объясняется тем, что энергия от источника питания затрачивается не только на усиление переменной составляющей входного сигнала, но и на создание постоянной составляющей Ia_o, которая является бесполезной и в дальнейшем отсекается разделительным конденсатором. Положение рабочей точки, эпюры напряжений и токов и нагрузочной прямой показаны на рисунке 5.2.

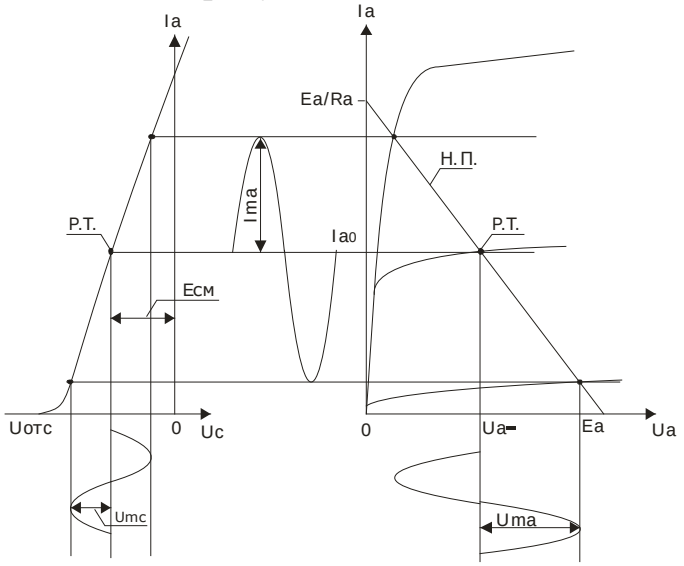


Рисунок 5.2

В режиме работы класса А рабочая точка устанавливается на линейном участке проходной динамической характеристики. Для этого на управляющую сетку лампы необходимо подать постоянное напряжение, которое называется напряжением смещения.

Каскады, работающие в таком режиме, применяют для усиления слабых сигналов (каскады предварительного усиления).

Класс В - режим усиления, в котором напряжение смещения на управляющей сетке равно величине, при которой анодный ток, протекающий через лампу, близок к нулю т.е напряжению отсечки. Идеальным (расчетным) усилителем класса В является усилитель, в котором форма кривой переменной составляющей анодного тока является точным воспроизведением полупериода напряжения, приложенного к управляющей сетке, и анодный ток протекает точно в течение полупериода колебания. Как показано на рисунке 5.3.

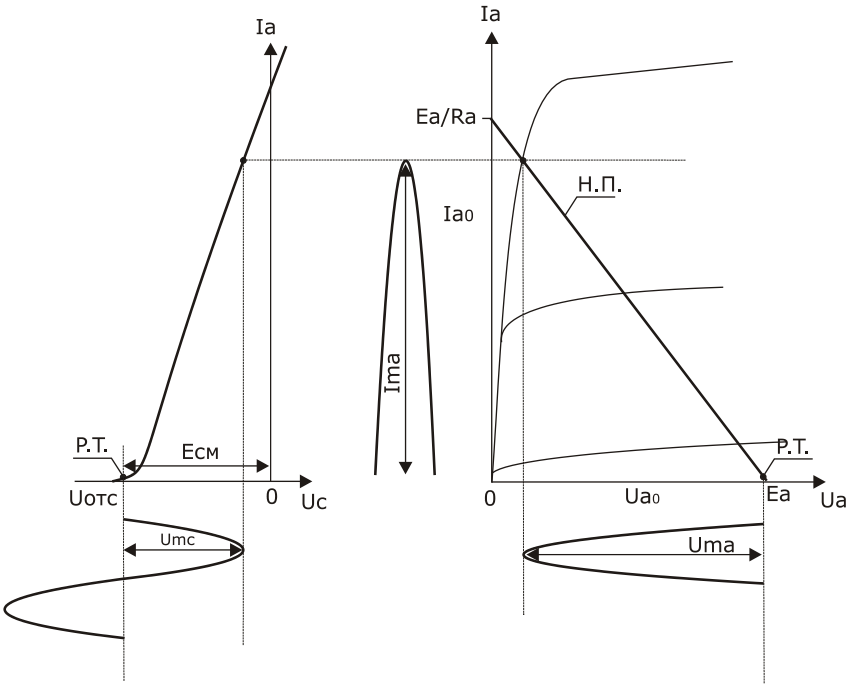


Рисунок 5.3

Режим работы класса В характеризуется углом отсечки Θ.

Углом отсечки называется половина той части периода, за которую в выходной цепи будет протекать ток. Для режима класса В угол отсечки Θ = 90°. Характеризуется режим класса В высоким КПД η = 60 ÷ 70 %. Недостатком режима класса В являются большие нелинейные искажения. Применяется режим класса В в выходных двухтактных усилителях мощности низкой частоты и оконечных каскадах передающих устройств.

Режим работы класса В характеризуется также степенью напряженности режима. Существует три степени напряженности:

Недонапряженный режим – режим, который характерен отсутствием сеточных токов лампы, а также тем, что импульсный анодный ток меньше величины тока насыщения лампы. Такой режим применяется в двухтактных схемах оконечных каскадах усилителей низкой частоты.

Напряженный режим – режим, при котором возможно появления сеточных токов и величина импульса анодного тока равна току насыщения. Такой режим применяется в оконечных каскадах передающих устройств.

Перенапряженный режим – режим работы с большими сеточными токами, при которых появляется провал в импульсе тока анодной цепи. Такой режим применяется в оконечных каскадах передающих устройств и умножителях частоты.

Кроме выше описанных двух основных классов усиления существует класс АВ - промежуточный между классами А и В. В этом режиме напряжение смещения на управляющей сетке имеет величину, при которой анодный ток протекает через лампу за время, меньшее, чем период, но большее, чем полупериод. При отсутствии переменного напряжения на управляющей сетке ток через лампу составляет очень малую величину. Цифры возле букв обозначают режим работы сетки. Цифра 1 указывает, что ток в цепи сетки усилительной лампы отсутствует, а цифра 2 указывает на режим усилительной лампы с токами в цепи, управляющей сетки.

Усилитель, работающий в режиме класса АВ2, имеет к.п.д. до 65%, а в режиме класса АВ1 - до 50%. Режим класса АВ1 применяется при усилении мощности до 100 Вт, а режим АВ2 - более 100 Вт.

Работа лампы в режиме усиления оценивается с помощью коэффициента усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{ma}}{U_{mc}} = -\frac{\mu}{1+\frac{R_i}{R}} \qquad (5.2)$$

где *Uma* - выходное переменное напряжение *Uвых*; *Umc* - переменное напряжение на первой сетке *U*вх, а также с выходной мощностью

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} R I_{ma}^2 = \frac{1}{2} U_{ma} I_{ma}, \qquad (5.3)$$

где I_{ma} – переменная составляющая анодного тока,
мощностью подводимой к анодной цепи лампы

$$P_A = E_A \cdot I_A \qquad (5.4)$$

коэффициентом полезного действия анодной цепи

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_A} \cdot 100\% \qquad (5.5)$$

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Подготовить к работе лабораторный стенд. Установить регуляторы анодного и сеточного напряжений в крайне левое положение. Убедиться (не включая стенд) что стрелка миллиамперметра измеряющего анодные токи электровакуумных приборов находится точно на отметке «0». Установить переключатели S2 в верхнее положение, а переключатель S5 в нижнее положение. Переключатель S3 установить в нижнее положение. Подать напряжение питающей сети и включить стенд с помощью выключателя «Сеть». При включении должен загореться индикаторный светодиод над включателем.

2. Нажать третью клавишу переключателя S1 (счет ведется слева на право) на передней панели стенда, что даст возможность исследовать электровакуумный пентод.
3. От внутреннего источника питания запитать цепь накала исследуемого пентода. Дать прогреться катоду лампы в течение 2-3 минут.
4. Используя анодно-сеточные (проходные) характеристики, полученные в лабораторной работе №4 на характеристике для напряжения Ua = 50В определить линейный участок. Определить значения напряжений на управляющей сетке пентода для границ линейного участка. Рассчитать напряжение смещения Uc_0 для режима класса А, и анодное напряжение рабочей точки.
5.Установить напряжение на первой сетке пентода напряжение равное напряжению смещения Uc_0.
6. Изменяя напряжение питания анодной цепи пентода установить напряжение на аноде пентода равным напряжению рабочей точки.
7. Измерить величину анодного тока и напряжения покоя для режима класса А и результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты измерения параметров каскада на пентоде

Класс работы усилителя	Характеристики рабочей точки				Характеристики каскада в сигнальном режиме						
	Напряжение сетки Uc_0, В	Анодное напряжение покоя Ua_0,	Анодный ток покоя Ia_0, мА В	Напряжение питания анодной цепи, Ea	Выходное напряже-ние каскада Uma, В	Сопротивление нагрузки Ra, кОм	Коэффициент усиления каскада	Анодный ток каскада Ia, мА В	Выходная мощность каскада Рвых, Вт	Мощность, подводимая к анодной цепи каскада Ра, Вт	К.П.Д. анодной цепи, %
А				+50							
А				+100							
А				+150							
В				+50							
В				+100							
В				+150							

8. Подать на гнездо X1 сигнал с низкочастотного генератора напряжением 0,1В и частотой 1 кГц. Выходной сигнал каскада (Uma), который снимается с гнезда X2, подать на осциллограф. Произвести настройку осциллографа для удобного наблюдения выходного сигнала (выбрать предел измерения амплитуд, необходимую скорость развертки произвести внутреннюю синхронизацию сигнала). Увеличивая выходной сигнал генератора (входное

напряжение каскада) и наблюдая за выходным сигналом отметить момент, когда выходной сигнал начнет искажаться (ограничиваться). Если сигнал ограничивается только с одной стороны, изменением напряжения на управляющей сетке пентода, попытаться устранить искажения и продолжить увеличение входного сигнала. При правильно выбранной рабочей точке ограничение сигнала должно наступать с обеих сторон одновременно. Зарисовать эпюры входного и выходного сигналов. Если напряжение входного сигнала большее 1В установить его равное 1В и измерить амплитуду выходного сигнала.

9. Рассчитать коэффициент усиления каскада мощность и к.п.д. анодной цепи.

10. Выполнить пункты 4-9 для напряжений питания анодной цепи пентода *Ea= 100B* и *Ea= 150B*

11.Для исследования каскада в режиме класса В установить напряжение питания анодной цепи пентода *Ea= 50B.*и напряжение на первой сетке U_{c_0} = -10 В.

13. Для обеспечения работы каскада в режиме класса В изменяя напряжение смещения на первой сетке пентода установить величину тока в анодной цепи пентода *Ia=0,3мА.* Подать на вход каскада через гнездо X1 сигнал с низкочастотного генератора напряжением 1В и частотой 1 кГц. Выходной сигнал каскада (Uma), который снимается с гнезда X2, подать на осциллограф. Произвести настройку осциллографа для удобного наблюдения выходного сигнала (выбрать предел измерения амплитуд, необходимую скорость развертки произвести внутреннюю синхронизацию сигнала). Увеличивая выходной сигнал генератора (входное напряжение каскада) и наблюдая за выходным сигналом отметить момент, когда выходной сигнал начнет искажаться (ограничиваться) снизу. Результаты измерений занести в таблицу.

14. Рассчитать коэффициент усиления каскада мощность и кпд анодной цепи.

15. Установить напряжение питания анодной цепи пентода *Ea= 100B.* и повторить действия п.13 и п.14.

16. Установить напряжение питания анодной цепи пентода *Ea= 150B.* и повторить действия п.13 и п.14.

17. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

1.5 Содержание отчета

в отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения токов и напряжений;
- результаты расчетов параметров каскада на электровакуумном пентоде;
-эпюры напряжений сеточных и анодных цепей каскада (на вольтамперных характеристиках пентода);
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. В каких режимах работают усилительные каскады ?
2. Физическое понятие рабочей точки усилительного каскада.
3. Перечислите основные характеристики усилительного каскада.
4. Почему в каскадах предварительного усиления лампы работают в режиме класса А.
5. Почему в оконечных каскадах усилителей лампы работают в режиме класса В (АВ)
6. Зависимость статических параметров от положения рабочей точки. Определение их по характеристикам.
7. Какие элементы влияют на широкополосность каскада?
8. Что такое угол отсечки, и от каких параметров каскада он зависит?
9. Почему коэффициент нелинейных искажений у каскада работающего в режиме класса А минимальный?
10. Какие элементы каскада влияют на его коэффициент усиления.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИТРОНА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

1.1 **Цель работы:** исследовать принцип действия и характеристики стабилитрона тлеющего разряда.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для построения вольтамперной характеристики стабилитрона тлеющего разряда и расчета его параметров.

1.3 Краткие теоретические сведения: стабилитрон тлеющего разряда – это газоразрядный прибор, предназначенный для стабилизации постоянного напряжения во вторичных источниках питания радиоэлектронной аппаратуры.

Газовым разрядом называется процесс прохождения электрического тока через газовую среду. Разряды, вызванные действием внешнего ионизатора (электрическое поле, радиоактивное излучение, космические лучи, световое излучение) называются несамостоятельными газовыми разрядами. Плотность электрического тока при таких разрядах описывается следующим выражением

$$j = j_+ + j_- \tag{6.1}$$

$$j_+ = n^+ e^+ b^+ E - e^+ D^+ \frac{dn^+}{dx}, \quad j_- = n^- e^- b^- E - e^- D^- \frac{dn^-}{dx}$$

где j^+ и j^- - плотности токов положительных и отрицательных ионов, n^+ и n^- - концентрации ионов разных знаков, b^+ и b^- - их подвижность, e^+ и e^- - заряды ионов, E – напряженность электрического поля, при котором в газе возникает упорядоченное движение ионов, D^+ и D^- - коэффициенты диффузии ионов. Напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд в газовой среде, называется напряжением пробоя газа. Величина напряжения пробоя газа зависит от давления газовой среды и расстояния между электродами внешнего ионизатора и описывается законом Пашена

$$V_{пр} = k\frac{P}{d} \tag{6.2}$$

где P – давление газа, а d – расстояние между электродами внешнего ионизатора.

В процессе прохождения электрического тока через газовую среду в нем могут возникать следующие виды разрядов:

- тлеющий разряд,
- искровой разряд,
- коронный разряд,
- дуговой разряд.

Самостоятельный разряд, в котором электроны испускаются катодом под воздействием положительных ионов газа, называют тлеющим разрядом. Такой разряд характеризуется большой напряженностью электрического поля и большой разностью потенциалов вблизи катода, которая обусловлена большой концентрацией положительных ионов. Тлеющий разряд используется в технике как источник световой энергии в различных газоразрядных трубках для рекламных и декоративных целей, а также для создания стабильных источников опорного напряжения (стабилитронов).

Вольтамперная характеристика стабилитрона, приведенная на рисунке 6.1. имеет участок на котором, при достаточно больших изменениях тока (от минимального $i_{МИН}$, до максимального i_{MAX}) через стабилитрон напряжение на его электродах изменяется незначительно. Такое напряжение называют напряжением стабилизации, и этот параметр является одним из основных параметров стабилитрона.

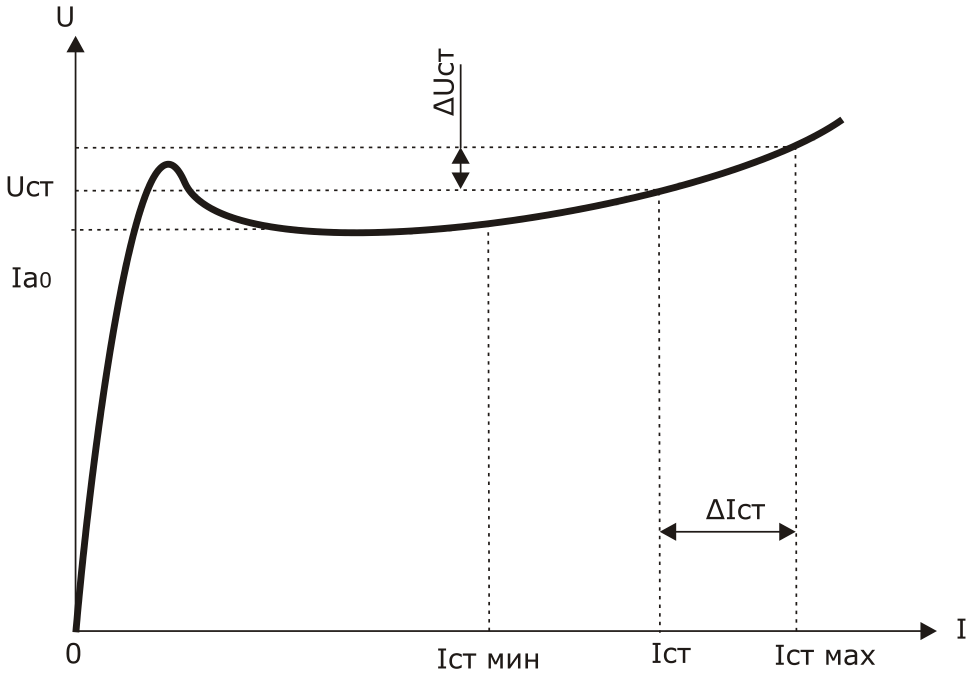


Рисунок 6.1 – Вольтамперная характеристика стабилитрона тлеющего разряда

Номинальному значению тока стабилизации ($i_{ст}$) соответствует напряжение стабилизации ($U_{ст}$). При изменении тока стабилизации от минимального до максимального значения имеет место изменение напряжения стабилизации на величину ($\Delta U_{ст}$) которая называется изменением напряжения стабилизации или нестабильностью.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона определяется как

$$R_g = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}. \qquad (6.3)$$

Внутреннее сопротивление стабилитрона определяется как

$$R_i = \frac{U_{CT}}{I_{CT}}. \qquad (6.4)$$

Чем меньше величина внутреннего сопротивления стабилитрона, тем выше его качество как стабилизатора. Также качество стабилитронов определяется таким параметром как временная нестабильность выходного напряжения

$$\delta = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta t}. \qquad (6.4)$$

где Δt – интервал времени, за который выходное напряжение изменилось на величину ΔUст.

Схема включения газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда показана на рисунке 6.2.

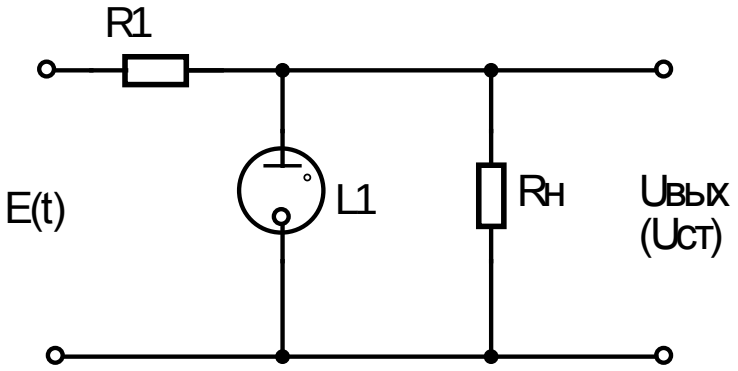


Рисунок 6.2 – Схема включения газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда

Резистор R1 служит для ограничения тока через стабилитрон на уровне тока стабилизации *Icm*. Коэффициент стабилизации такой схемы рассчитывается как

$$K_{CT} = \frac{\Delta E}{\Delta U_{ВЫХ}} = 1 + \frac{R1}{R_i} + \frac{R1}{R_н}. \qquad (6.4)$$

При малых значениях Ri это выражение упрощается до

$$\Delta U_{ВЫХ} \cong \Delta E \cdot \frac{R_i}{R1} << \Delta E \qquad (6.4)$$

Приведенные формулы показывают существенную роль резистора R1, выделяется переменная, во времени, часть входного напряжения. При этом стабилизация выходного напряжения тем, лучше, чем меньше внутреннее сопротивление стабилитрона *Ri.*

1.4 **Порядок выполнения работы:**

1. Подготовить к работе лабораторный стенд. Установить регуляторы анодного и сеточного напряжений в крайне левое положение. Убедиться (не включая стенд) что стрелка миллиамперметра измеряющего анодные токи электровакуумных приборов находится точно на отметке «0». Установить переключатели S2 в нижнее положение, а переключатель S5 в нижнее положение. Переключатель S3 установить в нижнее положение. Подать напряжение питающей сети и включить стенд с помощью выключателя «Сеть». При включении должен загореться индикаторный светодиод над включателем.
2. Нажать четвертую клавишу слева переключателя S1 на передней панели стенда, что даст возможность исследовать газорязрядный стабилитрон тлеющего разряда.
3. Изменяя напряжение на аноде стабилитрона от 0В до 140В через 10В, и фиксируя при этом величину анодного тока, снять вольтамперную характеристику (ВАХ) стабилитрона. Результаты измерений занести в таблицу 6.1. Рассчитать внутреннее и дифференциальное сопротивления стабилитрона и коэффициент стабилизации. Построить вольтамперную характеристику газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда.

Таблица 6.1 – результаты измерений и расчеты параметров газоразрядного стабилитрона

№ п/п	Анодное напряжение Ua, В	Анодный ток Ia, мА	Внутреннее Сопротивление Ri, кОм	Дифференциальное сопротивление Rg, кОм	Iст мин	Iст мах	Положение тумблера S2	Коэффициент стабилизации
1	0						разомкнут	
2	10						разомкнут	
3	20						разомкнут	
4	30						разомкнут	
5	40						разомкнут	
6	50						разомкнут	
7	60						разомкнут	
8	70						разомкнут	
9	80						разомкнут	
10	90						разомкнут	
11	100						разомкнут	
12	110						разомкнут	
13	120						разомкнут	
14	130						разомкнут	
15	140						разомкнут	

Продолжение таблицы 6.1

№ п/п	Анодное напряжение Ua, В	Анодный ток Ia, мА	Внутреннее Сопротивление Ri, кОм	Дифференциальное сопротивление Rg, кОм	Iст мин	Iст max	Положение тумблера S2	Коэффициент стабилизации
16	0						замкнут	
17	10						замкнут	
18	20						замкнут	
19	30						замкнут	
20	40						замкнут	
21	50						замкнут	
22	60						замкнут	
23	70						замкнут	
24	80						замкнут	
25	90						замкнуто	
26	100						замкнуто	
27	110						замкнуто	
28	120						замкнуто	
29	130						замкнуто	
30	140						замкнуто	

4. Установить тумблер S2 в верхнее положение. Повторить действия указанные в пункте 3.

5. После окончания выполнения работ установить регуляторы напряжений анодного и сеточного источников в крайнее левое положение. Выключить стенд с помощью сетевого выключателя. При выключении должен погаснуть индикаторный светодиод над сетевым выключателем. Отключить стенд от питающей сети.

1.5 Содержание отчета

в отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения токов и напряжений в цепях газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда;
- результаты расчетов параметров газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда;
-вольтамперные характеристики газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда;
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Виды разрядов в газовых средах.
2. Устройство и принцип действия стабилитрона тлеющего разряда.
3. Схема включения газоразрядного стабилитрона тлеющего разряда, и ее характеристики.
4. Что характеризует коэффициент стабилизации, и от каких элементов схемы он зависит?
5. Преимущества и недостатки газоразрядных стабилитронов тлеющего разряда.
6. Как зависит коэффициент стабилизации от величины токоограничивающего резистора?
7. Как зависит коэффициент стабилизации от величины сопротивления нагрузки?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОТКЛОНЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ ТРУБКИ С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

1.1 **Цель работы:** исследовать принцип действия и характеристики электроннолучевой трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением и измерить параметры ее отклоняющей системы.

1.2 Содержание работы: произвести необходимые измерения для расчета параметров характеризующих количественные характеристики канала вертикального отклонения ЭЛТ с электростатическим управлением.

1.3 Краткие теоретические сведения: Электронно-лучевые трубки (ЭЛТ) с электростатическим управлением, т. е. с фокусировкой и отклонением луча электрическим полем, называются электростатическими трубками и особенно широко применяются в осциллографах. Кроме того, ЭЛТ с электростатическим управлением применяются в качестве индикаторов (экраны радиолокаторов и гидролокаторов, дисплеи, устройства обработки воздушной и надводной информации).

Структура ЭЛТ с электростатическим управлением показана на рисунке 7.1. Баллон трубки имеет цилиндрическую форму с расширением в виде конуса или в виде цилиндра большего диаметра. На внутреннюю поверхность основания расширенной части нанесён люминофор – слой веществ, способных излучать оптическое излучение под ударами электронов. Внутри трубки расположены электроды, имеющие выводы, в основном, на жёсткие металлические штырьки цоколя.

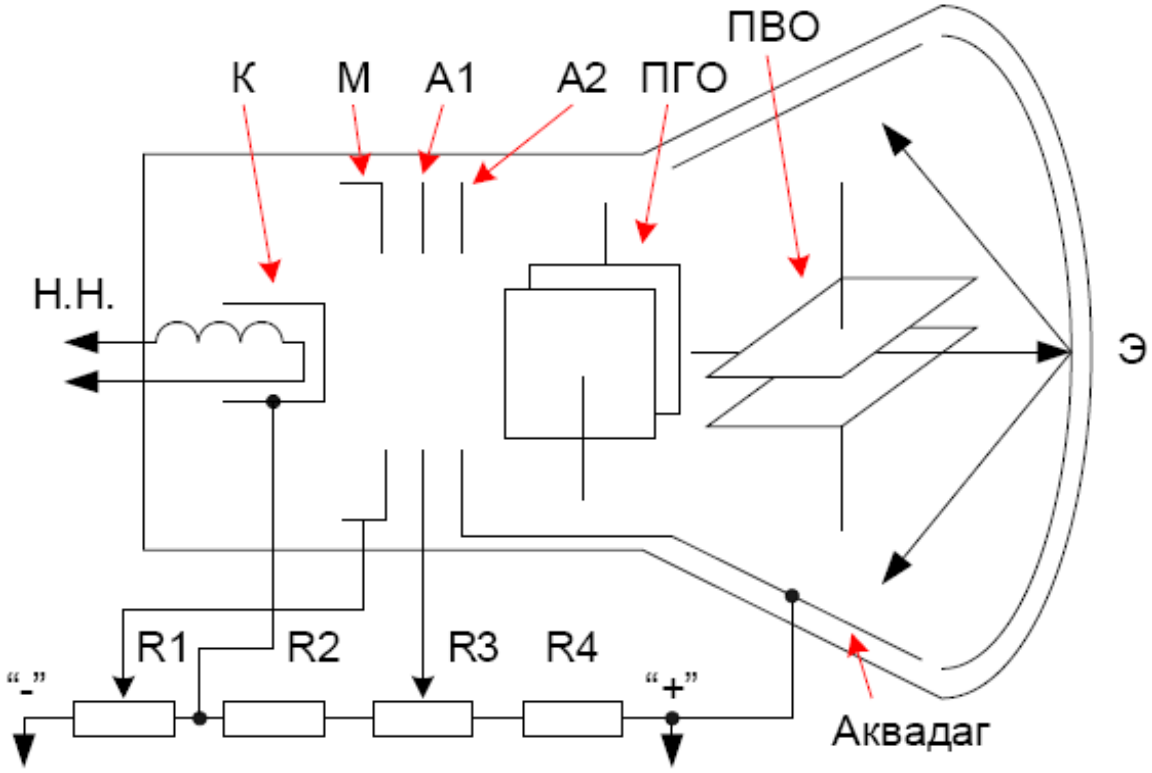


Рисунок 7.1

Катод ЭЛТ - оксидный косвенного накала. Вывод катода иногда совмещен с одним из выводов подогревателя. Оксидный слой нанесен на донышко катода.

Вокруг катода располагается управляющий электрод, называемый модулятором, цилиндрической формы с отверстием в донышке. Этот электрод служит для управления плотностью электронного потока и для предварительной его фокусировки. На модулятор подается отрицательное напряжение величиной несколько десятков вольт. Чем это напряжение больше, тем больше электронов возвращается на катод. При определённом отрицательном напряжении модулятора трубка запирается.

Другие электроды, также цилиндрической формы, являются анодами. В ЭЛТ их минимум два. Первый анод называется ускоряющим электродом. Второй анод называют фокусирующим электродом. На второй анод подается напряжение до нескольких киловольт (порядка 20 кВ), а на первый анод подается напряжение от 500В до 850В. Внутри анодов имеются перегородки с отверстиями (диафрагмы). Под действием ускоряющего поля анодов электроны приобретают значительную скорость. Окончательная фокусировка электронного потока осуществляется с помощью неоднородного электрического поля в пространстве между анодами, а также благодаря диафрагмам. Более сложные фокусирующие системы содержат большее число цилиндров.

Система, состоящая из катода, модулятора и анодов, называется электронным прожектором (электронной пушкой) и служит для создания электронного луча, т. е. тонкого потока электронов, летящих с большой скоростью от второго анода к люминесцентному экрану.

На пути электронного луча поставлены под прямым углом друг к другу две пары отклоняющих пластин ПВО и ПГО. Напряжение, подведённое к ним, создает электрическое поле, отклоняющее электронный луч в сторону положительно заряженной пластины. Поле пластин является для электронов поперечным как показано на рисунке 7.2. В таком поле электроны движутся по параболическим траекториям, а выйдя из него, далее движутся по инерции прямолинейно, т. е. электронный луч получает угловое отклонение.

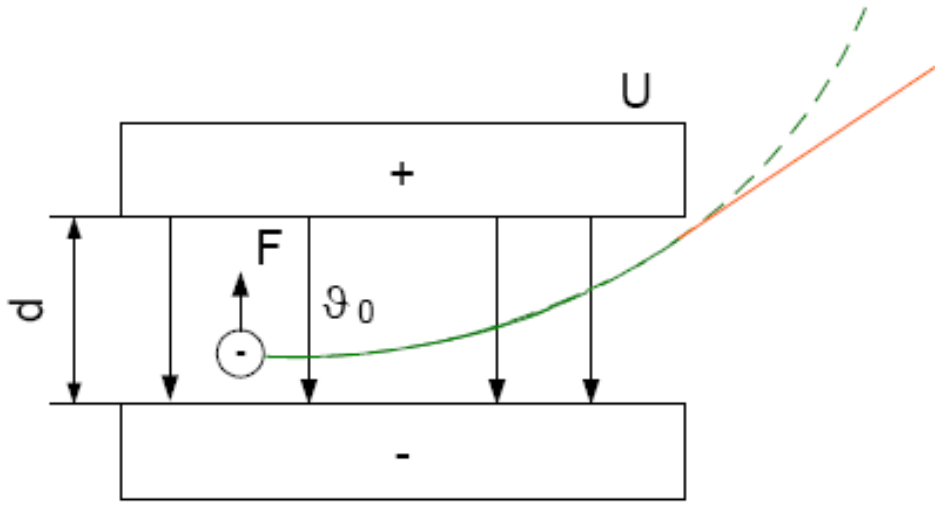


Рисунок 7.2

Чем больше напряжение на пластинах, тем сильнее отклоняется луч и тем больше смещается на люминесцентном экране светящееся, так называемое электронное пятно, возникающее от ударов электронов. Пластины ПВО, отклоняющие луч по вертикали, называются пластинами вертикального отклонения, а пластины ПГО – пластинами горизонтального отклонения. Одна пластина каждой пары иногда соединяется с общим проводом. Такое включение пластин называется несимметричным.

Так как на электронный луч могут влиять посторонние электрические и магнитные поля, то трубку часто помещают в экранирующий чехол из магнитомягкой стали.

Свечение люминесцентного экрана объясняется возбуждением атомов вещества экрана. Электроны, ударяясь в экран, передают свою энергию атомам экрана, в которых один из электронов переходит на более удаленную от ядра орбиту. При возвращении электрона обратно, на свою орбиту, выделяется квант световой энергии, называемый фотоном, и наблюдается свечение. Это явление называется катодолюминесценцией, а вещества, светящиеся под ударами электронов, называются катодолюминофорами или просто люминофорами.

Электроны, попадающие на экран, могут зарядить его отрицательно и создать тормозящее поле (поле объемного заряда), уменьшающее их скорость. От этого уменьшится яркость свечения экрана и может вообще прекратиться попадание электронов на экран. Поэтому необходимо снимать отрицательный заряд с экрана.

Для этого на внутреннюю поверхность баллона наносится проводящий слой. Он обычно бывает графитовым и называется аквадагом. Аквадаг соединяется со вторым анодом. Вторичные электроны, выбиваемые из экрана ударами первичных электронов, летят к проводящему слою. После ухода вторичных электронов потенциал экрана обычно близок к потенциалу проводящего слоя. В некоторых трубках имеется вывод от проводящего слоя, который можно использовать в качестве дополнительного анода с более высоким напряжением. При этом электроны дополнительно ускоряются после отклонения в системе отклоняющих пластин, что называется послеускорением. Проводящий слой также исключает образование на стенках баллона отрицательных зарядов от попадающих туда электронов. Эти заряды могут создавать дополнительные поля, нарушающие нормальную работу трубки. Если в трубке проводящего слоя нет, то вторичные электроны уходят с экрана на отклоняющие пластины и второй анод.

Питание электронного прожектора осуществляется через делитель напряжения. Чтобы регулирование яркости меньше влияло на фокусировку, первый анод делают без диафрагм. На него электроны не попадают, т. е. ток первого анода равен нулю. Современные электронные прожекторы дают на экране светящееся пятно с диаметром менее 0,002 от диаметра экрана.

Отклонение электронного луча электростатическим методом с образованием светящегося пятна на экране пропорционально напряжению на

отклоняющих пластинах. Коэффициент пропорциональности в этой зависимости называется **чувствительностью отклоняющей системы ЭЛТ**.

Если обозначить отклонение пятна по вертикали через **y**, а напряжение на пластинах y через **Uy**, то

$$y = Sy \cdot Uy \qquad (7.1),$$

где Sy – чувствительность трубки для пластин y.
Подобно этому отклонение светящейся точки по горизонтали

$$x = Sx \cdot Ux \qquad (7.2)$$

Таким образом, **чувствительность электростатической трубки – это отношение отклонения светящейся точки на экране к соответствующему отклоняющему напряжению:**

$$Sx = x / Ux \quad и \quad Sy = y / Uy \qquad (7.3)$$

Чувствительность ЭЛТ - это отклонение светящейся точки при изменении на 1 В отклоняющего напряжения. Выражают чувствительность в миллиметрах на вольт. Иногда под чувствительностью понимают величину, обратную Sx или Sy, и выражают её в вольтах на миллиметр.
Предыдущие формулы не означают, что чувствительность обратно пропорциональна отклоняющему напряжению. Если увеличить в несколько раз Uy, то во столько же раз возрастет y, а значение Sy останется без изменения. Следовательно, Sy не зависит от Uy. Чувствительность бывает в пределах 0,1 – 1,0 мм/В. Она зависит от напряжений на электродах ЭЛТ и геометрических размеров трубки.

1.4 Порядок выполнения работы:

1.Для выполнения исследования необходимо подготовить к работе в соответствии с руководством по эксплуатации осциллограф С1-67 и блок питания Б5-45 с диапазоном выходных напряжений 0-50В. Использование осциллографа С1-67 обусловлено тем, что его конструкция обеспечивает подачу напряжений непосредственно на вертикально-отклоняющие пластины.
2. Для выполнения измерения чувствительности вертикально-отклоняющих пластин необходимо переключить исследуемые пластины на внешние гнезда с помощью переключателя, который находится на левой боковой стенке осциллографа. Перевести канал горизонтального отклонения осциллографа в режим усиления тем самым, отключив генератор развертки. Установить с помощью регулятора горизонтального смещения луча светящееся пятно в центр экрана.
3. С помощью регуляторов «яркость», «фокусировка» получить минимально возможный диаметр светящейся точки в центре экрана.
4. С помощью штангенциркуля измерить длину вертикальной шкалы экрана ЭЛТ и определить цену малого деления вертикальной шкалы в мм.

5. Подать напряжение от источника Б5-45 непосредственно на отклоняющие пластины ЭЛТ осциллографа и увеличивая напряжение на его выходе наблюдать за отклонением луча от центра экрана.
6. При отклонении луча от центра на величину кратную большому делению вертикальной шкалы ЭЛТ измерить напряжение на выходе источника Б5-45 с помощью встроенного вольтметра. Увеличение выходного напряжения источника Б5-45 и измерения производить до тех пор, пока луч не достигнет последней отметки на экране. Результаты измерений занести в таблицу 7.1

Таблица 7.1 Результаты измерения чувствительности вертикально отклоняющих пластин ЭЛТ

№ п.п	Напряжение на пластинах Uпл,В	Смещение луча L, мм	Чувствительность пластин ЭЛТ Sy, В/мм
1	+		
2	+		
3	+		
4	+		
5	-		
6	-		
7	-		
8	-		

7. Установить выходное напряжение источника Б5-45 равным нулю. Изменить полярность напряжения подаваемого на вертикально-отклоняющие пластины ЭЛТ путем переключения проводов на выходных зажимах источника Б5-45. повторить действия указанные в п.п. 5,6.
8. Построить график зависимости величины отклонения луча на экране ЭЛТ от величины приложенного напряжения к вертикально – отклоняющим пластинам. Рассчитать величину чувствительности вертикально-отклоняющих пластин ЭЛТ и убедиться что зависимость отклонения луча от напряжения на пластинах ЭЛТ линейная.

1.5 В отчет вносят:

- тему и цель работы;
- результаты измерения напряжений на вертикально – отклоняющих пластинах ЭЛТ;
- результаты чувствительности вертикально – отклоняющих пластин ЭЛТ;
-графики зависимости величины отклонения луча от приложенного к вертикально – отклоняющим пластинам напряжения.
- выводы по работе.

1.6 Контрольные вопросы

1. Виды электронно-лучевых трубок.
2. Устройство и принцип действия электронно-лучевой трубки.
3. Какие методы фокусировки луча применяются в ЭЛТ.
4. Для чего служат горизонтально-отклоняющие и вертикально-отклоняющие пластины в ЭЛТ?
5. Как называется вещество, которым покрывают экран ЭЛТ.
6. Для каких целей служит первый анод в ЭЛТ?
7. Для каких целей служит второй анод в ЭЛТ?
8. Что характеризует параметр - чувствительность отклоняющей системы ЭЛТ?
9. От каких конструктивных параметров ЭЛТ зависит чувствительность отклоняющей системы и быстродействие ЭЛТ?
10. От каких параметров ЭЛТ зависит чувствительность отклоняющей системы?

Підписано до друку 28.09.2006 р. Формат 60х84 1/32. Папір офсетний.
Умовн. друк. арк. 5,7. Наклад 100 прим.
Замовлення №_____.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з комп'ютерного оригінал-макету

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
РВВ ЗДІА, тел. 2238-240