

11. Mérés

Elektroncső alapok

2016.10.09.

11.1 Elméleti áttekintés:

11.1.1 Az elektroncső működése

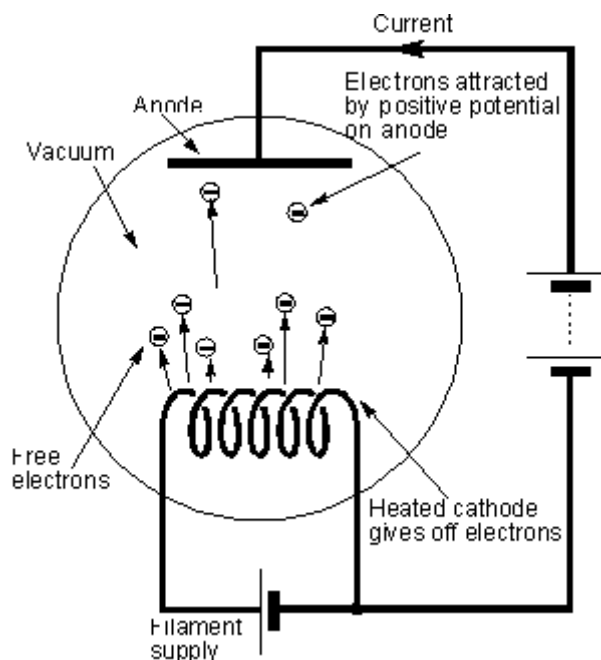
Szerző: Bozó Balázs /elektroncso.hu/

Edison, aki az első gyakorlatilag is használható izzólámpát készítette és az izzólámpa tömeges gyártásának a módszereit is kidolgozta, egyszer érdekes jelenségre lett figyelmes. Izzóval végzett kísérletei során, az izzószálon kívül még egy, kivezetéssel ellátott fémlemezt forrasztott az üvegburába. Azt tapasztalta, hogy ha az izzószál és a fémlemez közé feszültségforrást kapcsol, azon áram folyik annak ellenére, hogy látszólag nincs zárt áramkör. Az izzószál és a fémlemez nincsenek egymással összekötve, a burán belül. A kettő között nincsen semmi, még csak levegő sem. Arra sem lehet gondolni, hogy esetleg a levegő vezeti az áramot. Azt is észrevette Edison, hogy ez az áram csak akkor folyik, ha a lámpa izzószála izzik. Ezt a jelenséget később Edison jelenségnek nevezték.

Az izzószálként használt fémszál belsejében szabad elektronok vannak. A fémszál belső energiája megnő az izzítás hatására olyannyira, hogy a belsejében található szabad elektronok az izzó fémszálat, mintegy elektron felhővel veszik körül. A bura belsejében vákuum található így a kilépő elektronokat nem gátolja a levegő molekuláival való ütközés. Ezt a jelenséget termikus emisszióknak nevezik. Ha az izzószálból kilépő elektronok megfelelő sűrűségűre hizlalták az elektronfelhőt, így annak további gyarapodása megszűnik, hiszen az elektron töltése is negatív. A negatív töltésű elektronfelhővel taszítják egymást és így az mintegy visszaszorította a fémszálba a kilépni kívánó további elektronokat. Mivel azonban egy további fémlemezt is helyeztünk a burába, amire egy feszültség forrás pozitív pólusát kötöttük az elektron felhőnek nincs ideje kialakulni, hiszen a pozitívabb fémlemez mintegy szivattyú vonzza a negatívabb elektronokat magába. A fémlemezről az elektronok az egyenáramú áramforráson keresztül ismét az izzószálba jutnak, így zárt áramkört kapunk. Az egész áramkörben egyenáram folyik.

Mi történik akkor, ha az áramforrást fordítva kapcsoljuk az áramkörbe úgy, hogy az izzószálhoz a pozitív, a fémlemezhez a negatív pólusa kapcsolódjon? Ebben az esetben természetesen nem folyik áram. A negatív töltésű fémlemez nem vonzza magához az izzószálból kilépett elektronokat. A hideg fémlemezből nem fognak elektronok kilépni, tehát a légüres burában nem folyik áram.

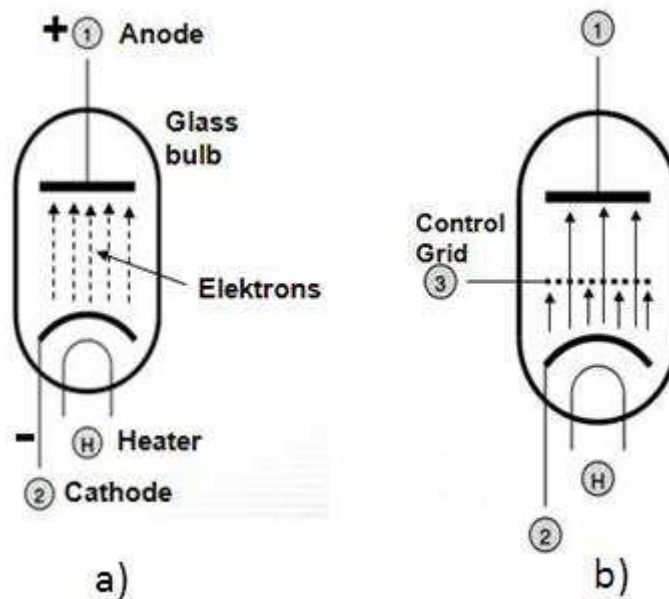
A fentebb leírt szerkezet már egy elektroncső, mégpedig a **dióda** leírása. A diódában két elektróda található. Az egyik elektróda az **anód**, mely az áramforrás pozitív sarkával van összekötve, és a **katód**, amely a negatívval. A dióda gyakran alkalmazott alkatrésze az elektronikának. Láttuk az előbb, hogy az áram csak egy irányban tud folyni a katódtól az anód felé. Ezért a dióda egyenirányításra használható.



1. ábra: Vákuumdióda működése (közvetlen fűtés)

A dióda gyakorlati megvalósítása csak annyiban szokott a fentebb leírtaktól eltérni, hogy a katódot kétféleképpen alakíthatják ki. Ha végiggondoljuk, beláthatjuk, hogy az izzításhoz használt áramforrás képes befolyásolni a kilépő elektronok eloszlását a katód felületén. Ezért később kifejlesztették a **közvetett (indirekt) fűtésű katódot**, amely az izzószal felöltötését jelentette, azaz behúzták egy csőbe. Ez a cső aztán egyenletesen izzítva egész felületén közel azonos mennyiségű elektront képes kiléptetni. Ennek a megoldásnak további előnye a váltakozó áramú fűtés estén a periodikusan váltakozó hőmérsékletű katód váltakozó emissziós képességének csökkentése. A fentebb leírt pusztán izzószalát használó megoldás a **közvetlen (direkt) fűtésű katód**. A közvetett fűtésű megoldásnál a katód anyaga leggyakrabban nikkal alapra felvitt báriumoxidot használnak, amelyet volfrám fűtőszállal hevítenek. Némely nagyteljesítményű elektroncsőben az anód megoldása is érdekessé válhat. Magát az anód lemezt a becsapódó elektronok melegítik. A melegítés nagy teljesítményű elektroncsövek esetén olyan mértékű is lehet, hogy az anód lemez hűtéséről a lemezből kialakított hűtő fülek már nem képesek fedezni a hűtést, szükségessé tehetik a levegő, illetve vízűtés használatát is.

Ha az üvegburába még egy elektródát szerelünk úgy, hogy a katód és az anód közé egy fém hálót készítünk három elektródás elektroncsőhöz jutunk: a **triódához**. A trióda egy olyan elektroncső, amely a rajta keresztül folyó áramot változtatni képes. Ezt a változást az éppen behelyezett elektróda vagyis a hozzá kapcsolt rácra végzi. Ha ugyanis a rácra szintén kapcsolunk egy feszültség forrást a negatív pólusával a rácra, pozitív pólusával a katódra kapcsolva észrevehetjük, hogy a csövön átfolyó áram lecsökkent, mégpedig azért, mert a rác negatív töltése taszítja a katód elektronjait, így az elektronok nem képesek a rác résein átjutni teljes mértékben. Ha felcseréljük a rácra kapcsolt feszültség forrás pólusait a rác pozitív töltése nemhogy akadályozza az elektronok áramlását, hanem még gyorsítja is azokat az anód felé. Ebből látható, hogy a rácra adott feszültséggel szabályozható az anódáram nagysága.



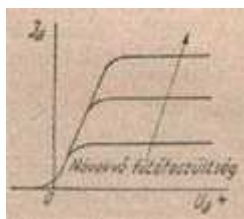
2. ábra: a, Vákuumdióda b, Trióda

11.1.2 A vákuumdióda

Szerző: Bozó Balázs /elektroncso.hu/

Mint ahogyan azt már az elektroncső működésénél láttuk a dióda, légüres burán belül kettő elektródával, rendelkezik; a két elektróda közül az egyik a katód, amelyet magas hőfokra hevítenek, ami által emittálóvá válik, és a feszültségforrás negatív sarkával kötnék össze, a másik az elektronokat felfogó anód, amely a pozitív sarkokkal van összeköttetésben. A katód izzítása mindig elektromos áram segítségével történik; léteznek ún. közvetlen (direkt) fűtésű katódok, amelyeknél az izzószál és a katód azonosak, és vannak közvetett (indirekt) izzítású katódok, amelyeknél a fűtő áram által izzásba hozott külön fűtőtest hevíti kellő hőfokra a többnyire elektromosan elszigetelt katódot. A legelső elektroncsövek mind közvetlen izzításúak voltak, és a katódayanyaguk volfrám volt, mivel a volfrámot légüres térben a legmagasabb hőmérsékletűre hevíthetjük és ez által a lehető legnagyobb elektronemissziót érhetjük el. A későbbiekben a tóriummal ötvözött volfrám még jobb emissziós tulajdonságaival lehetővé tette, hogy csökkentsék az izzó felület hőfokát és az ezzel együtt járó izzító teljesítményt. Még jobb emissziós tulajdonságú, tehát még kevesebb fűtő teljesítményt igényel az ún. oxidkatód, amelynél a hordozót a nikkelt katód fémét bárium, stroncium és kalcium oxidjának keverékével vonják be. Míg a tiszta volfrám szálas csövek katódja 2400 - 2700°C hőmérsékleten izzik, a tóriumos volfrámszál hőmérséklete 1800 – 2000°C, addig az oxidkatódok hőfoka 800 – 1100°C. Tulajdonképpen ez tette lehetővé a közvetett fűtésű csövek előállítását, mert a fűtőtestnek természetesen jóval magasabb hőmérsékleten kell izzania, mint az általa izzásba hozott katódnak.

Az indirekt fűtésű csövek katódja nikkelszál, amelybe hőálló, alumíniumoxid szigeteléssel van elhelyezve a volfrámból készült fűtőtest. A bevonó anyag bárium-, stroncium- és esetleg kalcium-karbonátok keveréke, amelyből a gyártási eljárás során, hevítés által okozott bomlás következtében az illető fémek oxidjai keletkeznek. Ezen oxidokból a formálási eljárás során a katódok felületén igen vékony fémréteg, többnyire fémbárium keletkezik, és e vékony réteg kelti a tényleges emissziót.



3. ábra: A vákuumdióda karakterisztikája

Ha méréssel megállapítjuk az anódfeszültség – anódáram összefüggést, láthatjuk, hogy nulla sőt negatív feszültség hatására is folyik némi anód áram, amely a feszültség hatására meredeken növekszik, majd ott elér egy olyan határt, amely után a feszültséget hiába növeljük, az anódáram értéke állandó marad. Ez által három tartományt különíthetünk el egymástól a diagramban, melyek szinte észrevétlenül tűnnek át egymásba. Az első az induló áram tartománya. Itt az anódáram főleg a katód hőmérsékletétől, vagyis a kilépő elektronok kezdősebességétől függ. A második és legszélesebb tartomány az ún. tértöltési tartomány, amelyben a fajlagos anódáram főleg az anódfeszültségtől függ, a harmadik a telítési tartomány, amelyben az anódáram a katód hőfokától és anyagától függ. A hőfok függést világosan igazolja az ábra, amelynél láthatjuk, hogy nagyobb katódhőfoknál az áram megnövekszik.

Elméleti megfontolások alapján is meghatározható az egyes tartományokra vonatkozó törvényszerűségek. A telítési tartományban az áram értékét megadja a Richardson-törvény:

$$I_{At} = AT^2 \cdot e^{(-b/T)},$$

Ahol I_{At} a telítési áram 1cm^2 katódfelületről, A a katódfémre jellemző tényező, T a katód hőfoka K fokokban és b a katódfém felületére jellemző érték, az ún. kilépési munka hő ekvivalense. Látható, hogy az áram tényleg független az anódfeszültségtől.

Telítésnél az anód minden katódból kilépett elektront magához vonzott. A tértöltési tartomány anódfeszültség függő viselkedése viszont azt mutatja, hogy a telítési érték alatt kell lennie egy fizikai oknak, amely megakadályozza valamennyi kilépett elektron anódhoz áramlását. Ez az ok az ún. tértöltés, amelyet a katódból kilépett elektronok alkotnak, amelyek a katódot felhőszerűen sűrűn körülveszik. Mivel ezen katódot körülvevő elektronfelhő negatív töltésű részecskékből áll, a katód körül kialakul egy negatív potenciálminimum, amelyen az egyes elektronoknak át kell hatolniuk, mielőtt az anódot elérik. Ha az elektron sebessége ehhez nem elegendő, akkor az elektron lelassul, megáll, majd visszatér a katódhoz. Növekvő pozitív anódfeszültség hatására a tértöltés által okozott potenciálminimum közelebb húzódik a katódhoz, több elektron jut át rajta, és az anódáram megnövekszik. A tértöltés tartományában az anódáram értékét a Child-Langmuir-törvény adja meg. Ennek alakja – azon egyszerűsítő feltételezéssel, hogy a katódot valamennyi elektron nulla kezdő sebességgel hagyja el:

$$I_A = (2,33 \cdot A) / d^2 \cdot 10^{-6} \cdot U_A^{3/2} = K \cdot U_A^{3/2} \text{ [Amper]}$$

Ahol d az anód-katód közötti távolság cm -ben, A katód felülete cm^2 , U_A az anódfeszültség Voltban. A kifejezésben elhanyagoltuk az elektronok kezdő sebességét, amellyel a katódot elhagyják. Ennek tekintetbe vételével kitűnik, hogy a **3/2 hatványú törvény** változatlanul érvényben marad, csak az anódáram nő meg, és ennek következtében negatív anódfeszültségeknél is lesz anód áram. Egy további tényező is befolyásolja az anódáramot, mégpedig az anódot és a katódot alkotó fémek közötti kontakt potenciál, amely általában a pozitív feszültségek felé tolja el a karakterisztikát. A diódák különböző alkalmazása esetén ezen mellékeffektusoknak jelentős szerepük lehet.

Diódákat vagy hálózati váltófeszültség egyenirányítására, vagy demoduláláshoz használnak. Az első esetben jelentős nagyságú áramok folynak a csövön keresztül, és a jó hatásfok megkívánja, hogy az anód – katód közötti feszültségesés a lehető legkisebb legyen. Ennek érdekében szükséges, hogy az egyenirányításhoz használt dióda telítési árama nagy legyen. Oxidkatód használata esetén a katód hőmérsékletének szűk határok között kell maradnia, ha a csőtől hosszú élettartamot kívánunk. Túlságosan magas hőmérsékleten a vékony fémes báriumbevonat elpárolog, és az emisszió lecsökken. Túlságosan alacsony hőmérsékleten egyrészt szigetelő réteg keletkezik a katódbevonat és a nikkelcső között, amely megnöveli a feszültségesését a csövön, másrészt az alacsony hőmérsékleten lévő emissziós réteget „megmérgezi” a csőben lévő és a réteg által elnyelt gázmaradék. A kifejezés szerint tehát az egyenirányításhoz használatos diódának nagy felületű katóddal kell rendelkeznie, és az anód – katód közötti távolság a lehető legkisebb legyen. Mivel az egyenirányítandó feszültségamplitudó rendszerint igen nagy, a dióda karakterisztika alsó könyökének alakulása általában nem lényeges.

A demoduláláshoz felhasznált diódáknál azonban az $I_a - U_a$ karakterisztika linearitása igen fontos, és mivel a demodulálendő feszültségek amplitudója rendszerint kicsi, az anódáram indulási pontja is igen fontos. Másrészt viszont a demodulátordióda árama igen kis értékű, és ezért nagy telítési áram nem szükséges.

A diódát egyenáramú ellenállásával, differenciális vagy más néven belső ellenállásával és jelleggörbéjének meredekségével szokták jellemezni. Az egyenáramú és a belső ellenállást mindig valamely munkapontra vonatkoztatva adják meg. Munkapontnak az összetartozó anódfeszültség – anódáram értékpárok által a jelleggörbén meghatározott pontot nevezik.

A dióda egyenáramú ellenállása;

$$R_E = U_A / I_A,$$

Belső ellenállása:

$$R_b = \Delta U_A / \Delta I_A$$

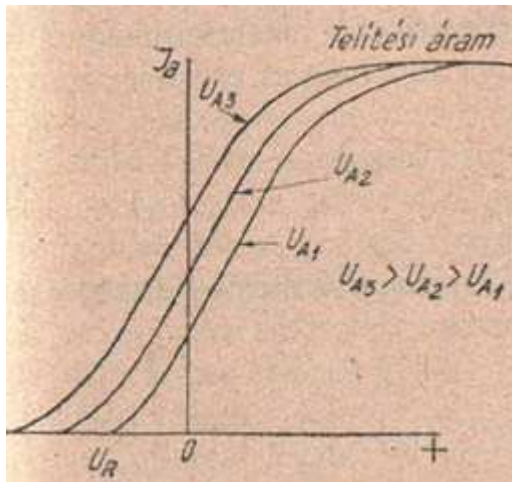
A belső ellenállás tehát azt jellemzi, hogy adott anódfeszültség-változás mekkora anódáram változást eredményez.

A jelleggörbe meredekségét, amelyet **S**-el jelölünk, a következő összefüggés határozza meg:

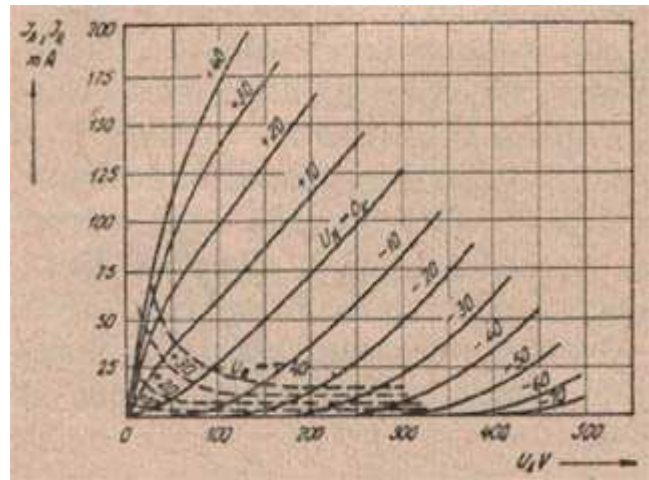
$$S = 1/R_b = \Delta I_A / \Delta U_A.$$

11.1.2 A trióda

Szerző: Bozó Balázs /elektroncso.hu/



4/a ábra: Rácskarakterisztika



4/b ábra: Anódkarakterisztika

A trióda három elektródával, rendelkezik; a katódon és az anódon kívül, de fizikailag e két elektróda között helyezkedik el a **rács** (grid) elektróda. A rácstra adott feszültség segítségével szabályozható az anód árama. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a rácstra adott feszültség (U_R vagy U_G) változása, jóval nagyobb mértékű anódáram változást von maga után mindamelllett a rácsnál ehhez elhanyagolható teljesítmény szükséges. A rácshelyettesítő tulajdonságát legjobban a **rács-karakterisztika** (*transzfer*) szemlélteti. A rácshelyettesítő karakterisztika megadja az anódáram alakulását különböző rácshelyettesítő feszültségeknél; mivel az anódfeszültségnek is szerepe van az anódáram kialakulásában, az anód feszültség, mint paraméter szerepel. Látható, hogy nagyobb anódfeszültségeknél a görbe balra tolódik. Ha a rácshelyettesítő eléggé negatív, teljesen közömbösíti a pozitív anódfeszültség hatását és lezárja az anódáramot. Ha a rácshelyettesítő negatív feszültsége csökken, akkor az anódáram folyni kezd, és mindaddig emelkedik, amíg a cső telítésbe nem kerül. Mind addig, amíg a katódhoz képest a rácshelyettesítő negatív, a rácshelyettesítő elektron nem jut el, mihelyt pozitívvá válik, a rácshelyettesítő is repülnek elektronok és a rácshelyettesítő indul meg. Közvetett fűtésű csöveknél az induló áram törvényének megfelelően már kis negatív rácshelyettesítő feszültségnél is megindul a rácshelyettesítő áram. Ilyenkor természetesen a rácshelyettesítő kör már teljesítményt is felvesz, amelyet a külső áramforrásnak fedeznie kell, ezért általában a pozitív rácshelyettesítő meghajtást nem használják, csak igen nagy teljesítményű erősítőknél, mint például adóberendezéseknél. Ilyenkor a meginduló rácshelyettesítő áram hatására rendszerint torzítások lépnek fel, amelyek kiküszöbölése külön feladat.

Egy másik igen gyakran használt jelleggörbe-sorozat az ún. **anód-karakterisztika** (*kimeneti*). E görbékénél a trióda anódárama az anódfeszültség függvényében van felvéve, paraméter a rácshelyettesítő feszültség. Látható, hogy a görbék egymással közel párhuzamosak, negatívabb rácshelyettesítő feszültség a görbék jobbra a nagyobb anódfeszültségek irányába tolja el. Az anód-karakterisztika igen hasznos, mert segítségével lehet a csövek működésének és beállításának jellemző legkedvezőbb adatait meghatározni. Az anód-karakterisztikából látni, hogy növekvő negatív rácshelyettesítő feszültségek hatására az egyes karakterisztikák kezdeti görbülete egyre nagyobb lesz, nagy anódfeszültségek és előfeszültségek hatására az ún. lezárási tulajdonságok általában leromlanak. A triódáknak három legfontosabb jellemző adatuk van: az erősítési tényezője (jele μ), a meredeksége (S) és a belső ellenállása (R_b).

Az erősítési tényező. A csőkarakterisztikából látható, hogy az anódáram értéke nem változik, ha a rács feszültségének bizonyos megváltozását, ellenkező irányú és megfelelő nagyságú anódfeszültség-változással ellensúlyozzuk. E két változás aránya adja meg az erősítési tényezőt:

$$\mu = -\Delta U_A / \Delta U_R \quad (I_A \text{ konstans.})$$

A meredekség. Egy elektroncső meredekségének bizonyos rácsfeszültség-változás hatására állandó értékű anódfeszültségnél bekövetkező anódáram-változás hányadosát értik. Mértékegységének szokásos megadása mA/V:

$$S = \Delta I_A / \Delta U_R \quad (U_A \text{ konstans.})$$

Belső ellenállás. Az áram változás és a feszültség változás aránya a belső ellenállás. Látható, hogy a cső belső ellenállása nem állandó értékű, hanem függ az anódfeszültségtől és az anódáramtól. Minél nagyobb a munkapontban az anódáram, annál kisebb lesz a trióda belső ellenállása. Egészen kis áramoknál, ahol a karakterisztika görbültsége nagy, a belső ellenállás értéke jelentősen megnövekszik.

$$R_b = \Delta U_A / \Delta I_A \quad (U_R \text{ konstans.})$$

Az egyenáramú ellenállása természetesen különbözik ettől az értéktől. Az egyenáramú ellenállás értékét megadja a választott munkapontban fennálló anódfeszültség és anódáram hányadosa.

$$R_E = U_A / I_A$$

A három cső állandó jellemző összefüggésben van egymással. Ha felírjuk ugyanis a belső ellenállás és a meredekség szorzatát;

$$S \cdot R_b = (\Delta I_A / \Delta U_R) \cdot (\Delta U_A / \Delta I_A) = \Delta U_A / \Delta U_R = \mu = 1/D$$

Ezen összefüggéseket I. számú **Barkhausen-egyenletnek** nevezzük. Eszerint: $S \cdot R_b = \mu$, illetve $S \cdot R_b \cdot D = 1$.

A három csőtényező nagyságát a cső elektródáinak méretei és a csövön átfolyó áram határozzák meg. Könnyen lehet összefüggéseket találni a csőtényezők és a geometriai méretek és formák között. A cső erősítési tényezőjét növeli a rács sűrűségének, vagyis az egységnyi hosszúságra jutó menetek számának, vagy a rácshuzal átmérőjének növelése, valamint a rács és anód közötti távolság nagyobbítása.

Az elektroncső meredekségét növeli a katód felületének és a rács vezérlő képességének nagyobbítása. Az előbbit elsősorban a katód hosszúságának növelésével valósíthatjuk meg, a vezérlés hatékonyságát a rács – katód közötti távolság csökkentése emeli jelentősen, de növeli az egységnyi hosszúságra jutó menetszám növelése is. A katód felület növelése szükségessé teszi a fűtő teljesítmény növelését is.

A trióda anódáramának alakulása a rács és az anódfeszültség tekintetbe vételével. Elvileg az anódáram mindkét értéktől függ, tehát $I_A = f(U_R, U_A)$.

A függvény pontos alakja fizikai okokból nem lehet más, mint a kételektrodos csövekre is érvényes Child-törvény, a feszültség 3/2-es hatványának törvénye. A vezérlő feszültség értékét első közelítésre megadja az ún. II. Barkhausen-törvény:

$$U_v = U_R + (1/\mu) \cdot U_A.$$

A cső erősítési tényezőjének reciprok értékét nem csak a feszültségek viszonyából, hanem egyes elektródák egymáshoz viszonyított méreteiből is meghatározható. Ezért határozhatjuk meg a vezérlő feszültséget elektrosztatikus terek felvételével.

Mindezek alapján a **trióda anódárama** ($U_R = U_G$):

$$I_A = K U_V^{3/2} = K (U_R + (1/\mu) \cdot U_A)^{3/2}.$$

A trióda meredeksége tehát háromkettedes.

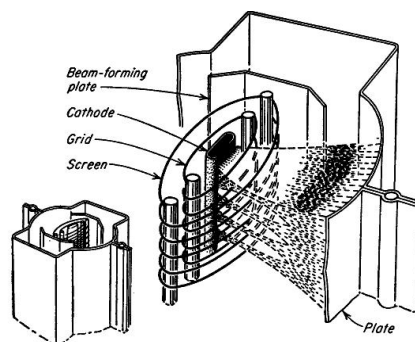
Ezek szerint az anódáram sem a rácsfeszültségtől, sem az anódfeszültségtől nem függ lineáris módon. Ez kellemetlen tulajdonsága az elektroncsöveknek, mert elméletileg kimondja, hogy **torzítatlan átvitel nem lehetséges**. Minden fáradozás, amelyek az erősítéstechnika fejlődését szolgálták, elsősorban a torzítások csökkenésére irányult.

11.1.2 A tetróda

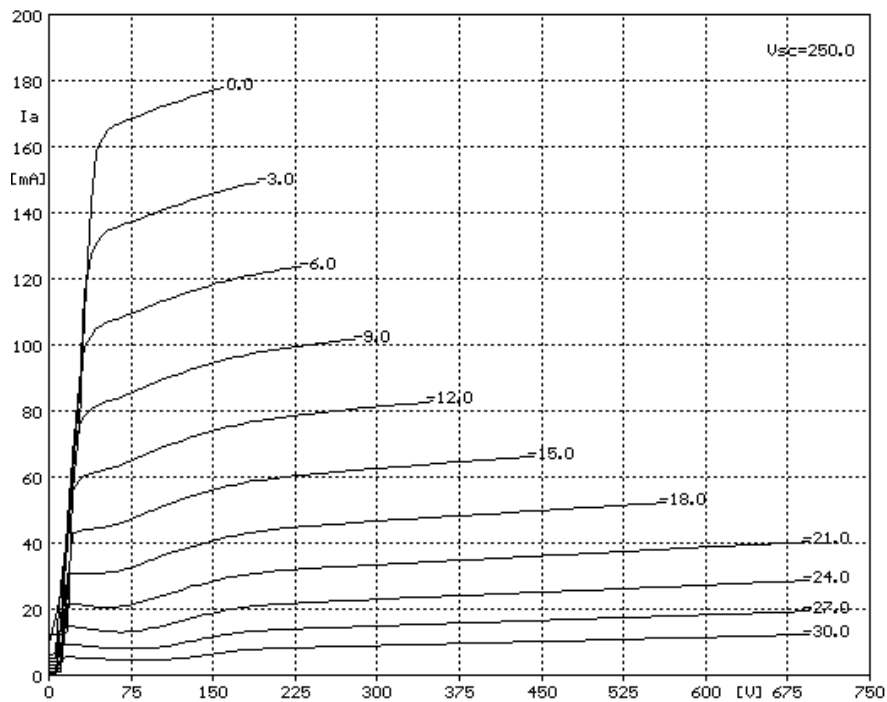
Szerző: Bozó Balázs /elektroncsu.hu/

A tetróda négyelektródás elektroncső. Az anód és a katód mellett további két rács található benne. Elsők között W. Schottky készített ilyen kétrácsos csöveket az 1915-ös évben. Schottky kétféle tetródát is készített. A korai rádiótechnika olyan csöveket igényelt, amely alacsony anód feszültség mellett is - már 20V anódfeszültség esetében is kielégítő teljesítményt szolgáltatott. Ezek a tetródák az úgynevezett **tértöltésrácsos** csövek. Jellemzőjük, hogy a katódhoz közelebb eső rács pozitív feszültséget kap, hogy a katódból kilépő elektronokat felgyorsítsa. Ez a "gyorsító" rács ritkább szövésű. A második rács - az anódhoz közelebb eső, sűrűbb szövésű, és ez a tulajdonképpen vezérlőrács. A hálózati táplálású csövek megjelenésével a tértöltésrácsú tetródák jelentősége oly mértékben csökkent, hogy gyártásuk megszűnt és előtérbe a másik, az úgynevezett **árnyékoltrácsú** tetródák kerültek.

Az árnyékoltrácsos tetródáknál, vagyis a négyelektródás csőnél az első rács – vezérlőrács – és az anód közé beiktatnak egy második, a katódhoz képest **állandó pozitív feszültségen tartott úgynevezett árnyékoló vagy más néven segédrácsot (screen) is**. A segédrács beépítése olyan előnyökkel jár, mint az anód és a vezérlőrács közötti **kapacitás lecsökkenése**, és az, hogy erősen megnövekszik a cső belső ellenállása. A második rács szerkezete attól függően változik, hogy a csővel milyen feladatot kívánnak ellátni. A rádiófrekvenciás erősítéshez előnyös, ha az anód és a vezérlőrács közötti kapacitás kicsiny és a belső ellenállás nagy. Emiatt nem csak sűrű a segédrács, hanem a kapacitás további csökkentése érdekében további (*sugárformáló*) lemezeket alkalmaznak a segédrács két végén. Ezzel szemben a hangfrekvenciás erősítőknél nem annyira lényeges a kapacitás értéke, inkább számít az alacsony belső ellenállás, és a magasabb meredekség, amely ritkább segédrácsot eredményez.



5. ábra: A tetróda felépítése



6. ábra: A tetróda kimeneti(anód) karakterisztikája

Egy tetróda rácskarakterisztikája teljesen hasonló a triódához, csak az U_a paraméter szerepét átveszi az U_{G2} segédrácsfeszültség. A nagy belső ellenállás miatt alig van szerepe az anódfeszültség értékének. Nagy különbség a triódához képest az árnyékolt rácsú tetróda anód-karakterisztikában mutatkozik. Bármelyik $I_a - U_a$ görbét is vizsgáljuk kitűnik, hogy a növekedő kis anódfeszültségeknél az anódáram erősen növekszik, egészen +10V-os értékig. A 10V-os feszültséggel gyorsított elektronok sebessége szekunder elektronok kiváltásához már elegendő, és a lassú szekunder elektronokat a pozitívabb segédrács magához vonzza, emiatt az anód áram csökkeni, a segédrácsáram pedig növekedni fog. Megfelelő körülmények között az anódból kilépő szekunder elektronok száma nagyobb, mint a primer elektronoké, és az anódáram így negatívvá válhat. A szekunder emissziós tartományban növekvő anódfeszültségnél csökken az anódáram. Ez **negatív ellenállásra** utaló jel, ennek következtében a csőhöz kapcsolt rezgőkör oszcillálni fog. (Ez az úgynevezett dinatron oszcillátor) Ha az anódfeszültség eléri a segédrács feszültségét, a szekunder emisszió észrevehető hatása megszűnik, innentől az I_a ismét emelkedni fog, I_{G2} csökken. A tetróda karakterisztika képen ez jól látható. Nagyobb feszültségen teljesen megszűnik az anód által okozott szekunder emisszió, ezzel szemben az alacsonyabb feszültségen lévő segédrács válthat ki szekunder emissziót.

A tetródáknál fellépő **szekunder emisszió** által okozott jelenség meghatározza a minimális anódfeszültséget, melyet tovább csökkenteni nem érdemes és valamivel magasabb, mint az alkalmazott segédrácsfeszültség. Ez sajnos behatárolja a cső által leadható maximális váltófeszültség értékét. A jelenség megszüntetésére több megoldást is kidolgoztak. A megoldások lényegileg egy minimális potenciálú helyet képeznek a segédrács és az anód között, amelyen a lassú szekunder elektronok nem képesek áthatolni. Ennek legegyszerűbb és legkézenfekvőbb megoldása egy további elektróda alkalmazása a segédrács és az anód között, amelyet elektromosan a katódhoz kötnek. Így jön létre az ötelektródás cső, a **pentóda**.

11.1.2 A pentóda

Szerző: Bozó Balázs /elektroncso.hu/

A pentóda **ötelektródás** elektroncső. Mint már a tetróda leírásánál láthattuk annak hátrányos tulajdonságait, a pentóda kifejlesztésének elsődleges célja ezeknek - a tetróda hátrányainak csökkentése, illetve megszüntetése volt. A megszüntetése igen egyszerű módon még egy rács - az anód és a második rács közé - illesztésével oldható meg. Ez az újabb rács rendszerint a katóddal össze van kötve, hogy a nagy pozitív potenciálú elektródákról kiinduló szekunder elektronokat lefékezze, és visszatérésre kényszerítse. Ezt a rácsot a funkciójából kiindulva fékezőrácsnak nevezik. Így a tetródára jellemző szekunder emisszió, éppen úgy elhanyagolhatóvá válik, mint a trióda esetében.

A pentóda katód árama tehát valamennyi elektródafeszültség lineáris kombinációjától függ:

$$I_K = f(U_{G1} + (U_{G2}/\mu_{12}) + (U_{G3}/\mu_{13}) + (U_A)/\mu_{1a}).$$

Az összefüggés elvileg hasonló alakot nyer, mint amit a triódánál már megismertünk:

$$I_K = K(U_{G1} + (U_{G2}/\mu_{12}) + (U_{G3}/\mu_{13}) + (U_A)/\mu_{1a})^{3/2}.$$

A katódáramot lényegileg tehát az U_{G1} és az U_{G2} befolyásolja. A triódának megfelelő analógiában az alábbi egyenlet alkalmazható:

$$I_K = (p/(p+1)) \cdot K \cdot (U_{g1} + (U_{g2}/\mu_{12}))^{3/2}.$$

A kis anódfeszültségek tartományától eltekintve, az árameloszlás igen csekély mértékben változik, és a p árameloszlási tényező $p = I_A/I_{g2}$, durva közelítésben akár állandónak is tekinthető. (p értéke csőtípustól függően 4...10 közötti szokott lenni.)

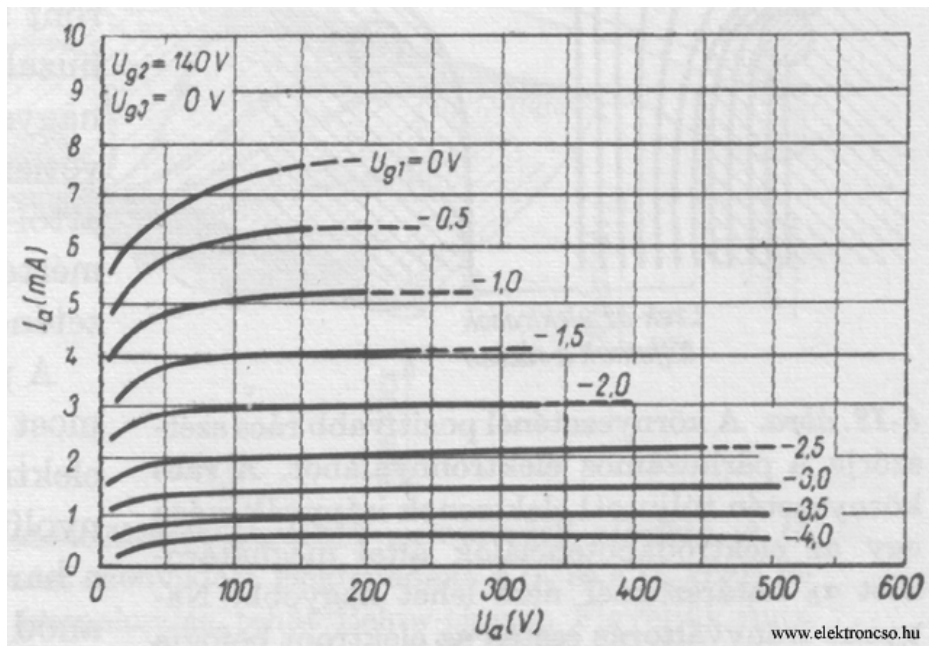
Ebből meghatározhatjuk a pentóda S_A anódmeredekségének és S_K katódmeredekségének kapcsolatát:

$$S_A = \delta I_A / \delta U_{g1} = (p/(p+1)) \cdot (\delta I_K / \delta U_{g1}) = (p/(p+1)) \cdot S_K$$

A fentebbi két meredekség fogalma a triódánál azonos volt, mivel az anód- és a katódáram megegyezett. Több pozitív elektródás elektroncsőveknél több elektróda áramról lehet szó, így a továbbiakban nem beszélhetünk általában meredekségről, rögzíteni kell, hogy melyik elektródafeszültségnek és melyik elektródaáramnak a kapcsolatát vizsgáljuk. Az előbbi egyenletekből:

$$R_b = \delta U_A / \delta I_A |_{U_{g1}; U_{g2}}.$$

Belső ellenállás végtelen nagynak adódik, amennyiben az árameloszlási tényezőt az anódfeszültségtől függetlennek tekintjük. Mivel a Barkhausen-féle összefüggés általános érvényű, pentódákra is felírható. $R_b = \infty$ alapján $\mu = \infty$ adódik, ami természetesen összhangban van azzal, hogy az anódáramot kifejező képletben elhanyagoltuk az anódfeszültség befolyását.



7. ábra: A pentóda kimeneti karakterisztikája

A pentóda tényleges karakterisztikáit figyelembe véve szembe ötlük, hogy 0 potenciálú anódra nem jut el anódáram, mert a 3. rács hatásos potenciálja közelítően zérus ($U_{G3} = U_K$). Az elektronok tehát nem jutnak el az anódhoz, hanem vissza fordulnak a segédrács felé. Lassan növelve az anódfeszültséget, emelkedik az U_{G3} hat. is. A segédrács által csak kis mértékben eltérített elektronok most már túlhaladnak a fékezőrácsra, eljutnak az anódhoz. A G_3 síkján áthaladó, illetve ott visszaforduló elektronok aránya igen nagy mértékben függ az U_{G3} hat.-tól tehát az anód feszültségtől is. Ez magyarázza a karakterisztika kezdeti meredeken emelkedő szakaszát. Az így kialakult, a harmadik rács fékező terében bekövetkező árameloszlás Below-típusúnak nevezzük. A pentóda karakterisztika ennek megfelelő szakasza a zérustól néhányszor 10V-os anódfeszültségig terjedő Below-tartomány. Ha tovább növeljük az anódfeszültséget, nem lesz többé visszafordult elektron, és megszűnik az árameloszlás a G_3 fékező terében. A katódáram anód és segédrács közti megoszlás már G_2 síkjában eldőlt. A segédrács síkjában bekövetkező árameloszlást Tank-típusúnak nevezzük, a pentóda karakterisztika ennek megfelelő, igen lankásan emelkedő szakasza a Tank-tartomány. A kettő közötti átmenet jól meghatározható, vagyis azt az anódfeszültséget, amely a kettőt elválasztja áramátvételi pontnak is nevezik, értéke a segédrácsfeszültség töredéke; kisebb (feszültségerősítő) pentódáknál $U_A \approx 0,3U_{g2}$, nagyobb (végerősítő) pentódáknál $U_A \approx 0,1U_{g2}$ körüli a szokásos értéke.

A pentóda belső ellenállása a Below-tartományban igen kicsi érték 1000 Ω nagyságrendű. A Tank-tartományban a belső ellenállás már több nagyságrenddel nagyobb értékű: 100k Ω ... 1M Ω . A Tank-tartománybeli belső ellenállás tehát: $R_b = b(U_A/I_A)$ ahol b a belső ellenállás-együttható, egy 10 nagyságrendjéhez közel eső állandó. A pentóda gyakorlati felhasználásaiban rendszerint a Tank-tartományon belül marad.

A különböző alkalmazási céloknak megfelelően a pentóda fajták jobban specializálódtak, mint például a triódák. Osztályozásuk a feldolgozott jel nagyságától függ, vagy működési frekvenciától.

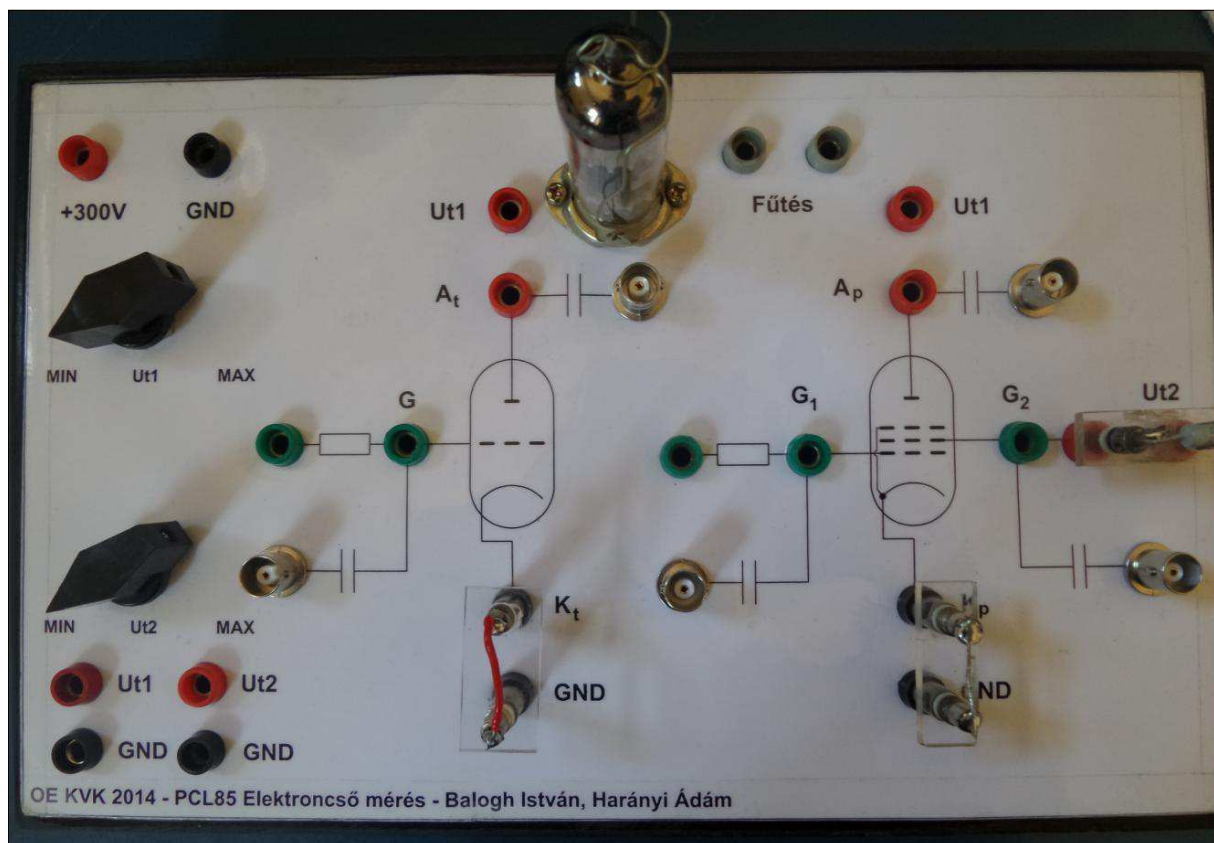
A kis jelű erősítő pentódák megengedhető anódterhelése 1..2W; a kivehető katódáram 10mA nagyságrendű szokott lenni. A kisfrekvenciás pentódák rendszerint előerősítőkben kerülnek felhasználásra, ezért konstrukciójuknál különös gondot kell fordítani a mikrofóniára (a cső

elektródáinak mechanikus rezgése) és a bűgásmentességre, mivel erősítésük igen nagy egy triódás fokozathoz képest.

A kis jelű nagyfrekvenciás pentódák nagyobb része az úgynevezett **szabályozó cső**. Ezek az eszközök kettős feladatúak. Erősítenek, és emellett erősítésük mértéke elektronikusan szabályozható. A cső meredekségét változtatjuk meg a vezérlőrács feszültségével. Ezt rendszerint geometriai megoldásokkal érik el.

A végerősítő pentódák igen fontos fajtája a pentódáknak. Jellegzetességük, hogy a lehetőleg nagy áramú és nagy feszültségű munkapontban dolgozik, ezért lehetőleg nagy hő teljesítmény lesugárzására alkalmas anóddal és nagy áram kivételére alkalmas katóddal rendelkezik. A nagy áramkivezérés megvalósítására a munkaponti segédrácsfeszültség rendszerint nagy, vagy alig különbözik a teljes rendelkezésre álló tápfeszültségtől. Hogy a cső működés közben még nagy váltakozó feszültségek esetében is Tank-tartományban maradjon, a konstrukciót úgy alakítják ki, hogy az áramátvételi pont lehetőleg kis anódfeszültségnél lépjen fel. A végerősítő pentódák céljait konstrukciós egyszerűsítéssel is el lehet érni, és így a pentóda 3. rácsa elhagyható, de ekkor már sugártetradáról beszélhetünk.

11.2 A mérőpanel és a vele kapcsolatos tudnivalók:



8. ábra: A mérődoboz felülnézete

- 1. FONTOS:** Mind a nagyfeszültségű (0-500V), mind pedig a mérőpanelba épített tápegységek (Ut1 és Ut2) forgatógombjait a mérés során **LASSAN** tekerjük fel- és lefelé egyaránt!
- A mérőpanel +300V tápfeszültség bemenetére elegendő pusztán **+220V**-ot kapcsolni. **Soha ne haladjuk meg a 300V-ot!**
- A mérőpanelon azonosan elnevezett mérőpontok ekvipotenciálisak.

4. Esetenként előfordulhat, hogy a trióda vagy a pentóda anódja esetleges túláram miatt izzásnak indul; ez esetben a nagyfeszültségű tápot kapcsoljuk le és jelezzük az oktatónak!

5. A trióda és a pentóda anódfeszültsége egyaránt U_{T1} -ből, a pentóda segédrácsfeszültsége pedig U_{T2} segéd tápokból nyerhetők ki (mérődobozon bal alul található pontokon célszerű ezen feszültségeket mérni a banándugók egymásba dugását és az ebből adódó esetleges zárlat elkerülése érdekében).

11.3 Mérési feladatok:

A mérés során a **PCF802** típusú ikercsővel, egy közös búrába helyezett triódával és pentódával fogunk megismerkedni. Az említett cső adatlapja mellékelésre kerül a laboratóriumi mérés során. Elektroncsövek esetén az első betű rendszerint a fűtés típusát határozza meg; jelen esetben a **P** betű 300mA fűtőáramot jelent (az **E** jelölés 6.3V fűtőfeszültséget jelent). A **C** betű triódát jelent, míg az **L** teljesítménypentódát (az F kisjelű pentódát jelent).

FONTOS: A nagyfeszültségű tápegység kimenete nem zárlatvédett, a „kimenet” kapcsolót csak akkor kapcsoljuk be, ha a teljes aktuális mérőkapcsolást összeállítottuk! (Ez után is 0-ról fokozatosan állítsuk be a kívánt kimeneti feszültséget.)

11.3.1: Fűtsük fel az elektroncsövet 15V feszültséggel (kb. 600mA áramkorlát mellett)! A mérés további részében nem kell folyton ki-be kapcsolgatni ezt a feszültséget, elég a mérés végeztével kikapcsolni.

11.3.2: Említésre került, hogy a katódból az anód felé töltések indulnak meg 0V tápfeszültség esetén is; az A_T (trióda anódja) és a GND csatlakozó közé helyezzünk árammérőt (HM8012 DMM uA méréshatárban), majd mérjük meg az áramot $U_G=0V$ esetén (azaz a trióda vezérlőrácsát kössük földpotenciálra) (*Segédlet: 9. ábra*)! *Az itt mért áram bizonyítja, hogy az elektroncső kimeneti karakterisztikája nem origóból indul!*

11.3.3: Csatlakoztassuk a nagyfeszültségű tápegységet (U_{T1}) a trióda anódjára az árammérőn keresztül (*Segédlet: 10. ábra*). Először állítsunk be 200V-os anódfeszültséget, majd mérjük meg a trióda anódáramát 0V-os gate-feszültség mellett és hasonlítsuk össze a katalógusban megadottal; a kettő aránya megadja a **katód emisszió képességét (d)**. A mért eredmény alapján ezt adjuk meg százalékosan ($I_A=I_K$):

$$d = \frac{I_{k(mért)}}{I_{k(katalógus)}} * 100\%$$

11.3.4: A trióda vezérlőrácsát kössük előjelhelyesen külső tápegységre, hogy annak gate-feszültsége (U_G) negatív tartományban vezérelhető legyen). U_G változtatásával és I_A egyidejű mérésével vegyük fel a trióda transzfer, azaz rácskarakterisztikáját (U_G-I_A) 100V majd 150V U_A mellett is. $U_G=0$ felett nem végzünk mérést, mivel a cső élettartamának rovására mehet (célszerű a 0,25V-os lépték) (*Segédlet: 11. ábra*). Jegyzőkönyv készítés során a mérési eredményeket hasonlítsuk össze a katalógusban szereplő transzfer karakterisztikával.

11.3.5: Állítsunk be $U_G = -1V$ rácsheszültséget, majd U_A -t változtassuk 0-200V-ig, ezzel felvéve egy kimeneti karakterisztikát (10V-os léptékekben). (Igény esetén két U_{G1} feszültség mellett is el lehet végezni a mérést, hogy jól látható legyen a karakterisztikák egymáshoz képesti eltolódása.) Jegyzőkönyv készítés során a mérési eredményeket hasonlítsuk össze a katalógusban szereplő kimeneti karakterisztikával.

11.3.6: Határozzuk meg a trióda három paraméterét (R_b , μ , S) és hasonlítsuk össze a katalógus adatokkal (jegyzőkönyvi feladat).

11.3.7: Áramtalanítsuk az áramkört (fűtést kivéve), majd bontsuk az eddigi kapcsolást. Kössük a pentódát **triódaüzembe!** Ez annyit tesz, hogy a G_2 segédrácsot az anódra kötjük, így a triódaéhoz hasonló karakterisztikákat kell kapnunk (*Segédlet: 12. ábra*). Mérjük meg a pentóda termikus áramát is 0V-os rácsheszültség mellett (HM8012 DMM μA méréshatárban).

11.3.8: Ismételjük meg a trióda karakterisztika-felvétellel kapcsolatos mérési pontjait, majd a kapott karakterisztikákat hasonlítsuk össze (**transzfer karakterisztikánál $U_A = 100V$, kimeneti karakterisztikánál $U_A = 150V$ maximum és $U_G = -1V$**). Ügyeljünk, hogy a pentóda árama ne haladja meg a katalógusban megadott értéket! Természetesen ezúttal az A_T helyett az A_P (pentóda anódja) és U_{I1} közé kössük az árammérőt (*Segédlet: 13. ábra*).

11.3.9: Határozzuk meg a triódákra jellemző 3 üzemi paramétert (jegyzőkönyvben)!

11.3.10: Kössük a pentódát **pentódaüzembe!** Az anód helyett ezúttal G_2 -t kössük $+U_{I2}$ pontra (mellékelt banándugós rövidzárral) (*Segédlet: 14. ábra*). Vegyük fel a pentóda transzfer-karakterisztikáját $U_A = 150V$ és $U_{G2} = 100V$ mellett valamint $U_{G2} = 180V$ mellett! A kapott két karakterisztika bizonyítja, hogy a cső meredeksége függ a G_2 feszültségtől (szabályozó cső az elméleti összefoglalóban).

11.3.11: Az anódkörből távolítsuk el az árammérőt, a helyére iktassunk be $62k\Omega$ anóddenállást, valamint a segédrács körbe $8,2k\Omega$ értékű ellenállást U_{I2} és G_2 közé (utóbbi a későbbi megvezérlést teszi lehetővé)! G_1 rácshoz tartozó BNC bementre tegyünk 50kHz-es $0,2V_{cs-cs}$ szinusz jelet $-2V$ rácsheszültség mellett (ellenálláson keresztül!); Az anódfeszültség legyen $U_A = 150V$, a segédrácsfeszültség pedig $U_{G2} = 110V$. A pentóda anódja után kötött kondenzátorról vegyük le a kimeneti jelet, majd határozzuk meg az erősítést!

* Opcionálisan figyelmen kívül lehet hagyni az ajánlott munkaponti feszültségeket (U_{G1} , U_{G2} , U_A) és keresni egy nagyobb meredekségű (erősítésű) munkapontot.

11.3.12: Az előbbi munkapontban hagyva a csövet ezúttal G_2 rácshoz tartozó BNC csatlakozóra adjunk 50kHz váltakozó áramú jelet, majd rögzítsük azt a bemeneti amplitúdót, ami esetén ugyanakkora kimeneti jelet kapunk, mintha G_1 -el vezérelnénk.

A korábban G_1 -re, most G_2 -re adott váltakozó áramú jelek amplitúdó-aránya a pentódára jellemző, **G_1 -re vonatkoztatott transzponációs tényező**, amely megadja, hogy G_2 rácson keresztül mennyivel kell nagyobb amplitúdóval vezérelni ugyanazon hatás eléréséhez:

$$\mu_{G2G1} = \frac{U_{beG2}}{U_{beG1}}$$

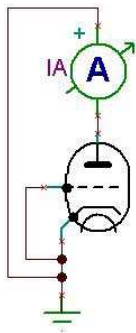
11.3.13: Amennyiben a két bemenetre egyidejűleg adunk vezérlőjelet, úgy a pentóda **additív (összegző) keverést** valósít meg. A két rendelkezésre álló függvénygenerátorral (Hameg és TR-010, utóbbin nem szükséges a beállítások módosítása) ez meg is valósítható. A gyakorlatban ezt úgy is szokás nevezni, hogy egyik jelet rászuperponáljuk a másikra, de ez a kifejezés inkább akkor használatos, ha a jelenség nem kívánatos (pl.: 50Hz „ráül” az Ethernet-vagy audiokábel jelére). *A sztereo multiplex átvitelnél a pilot-jelet ugyanilyen keverési eljárással adják hozzá az átvinni kívánt sztereo hang spektrumához.*

Az előző pont után a Hameg függvénygenerátor változatlanul G_2 -re csatlakoztatva maradhat, az RC generátort csatlakoztassuk G_1 -re. Az RC generátor beállításain ne módosítsunk!

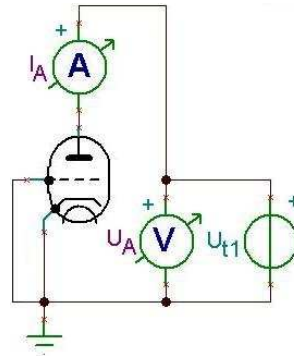
11.4 Ellenőrző kérdések:

- 1. Mi a termikus emisszió?
- 2. Mi a közvetlen és közvetett fűtés, és milyen különbségek állnak fenn közöttük (anyag, hőmérséklet)?
- 3. Hogyan függ a katód árama a hőmérsékletétől?
- 4. Mi az erősítési tényező (képlettel)?
- 5. Mi a meredekség (képlettel)?
- 6. Mi a belső ellenállás (képlettel)?
- 7. Milyen összefüggés áll fenn a meredekség, a belső ellenállás és az erősítési tényező között (Barkhausen-egyenlet)?
- 8. Mire szolgál a segédrács és hol helyezkedik el a többrácsos csövekben? Milyen előnyökhöz juttat a beiktatása a triódával szemben?
- 9. Mi a szekunder emisszió?
- 10. Mire szolgál a fékezőrács és hol helyezkedik el? Milyen előnyökkel szolgál a beiktatása a tetródával szemben?
- 11. Mi célt szolgálnak a szabályozó csövek?
- 12. Mit jelent csőfűtések esetén a P és E rövidítés?
- 13. Mit értünk egy katód emisszióképessége alatt?
- 14. Mi a triódaüzem?
- 15. Mi a transzponációs tényező?

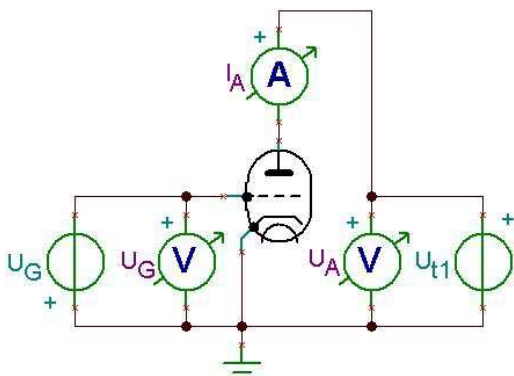
11.5 Segédlet:



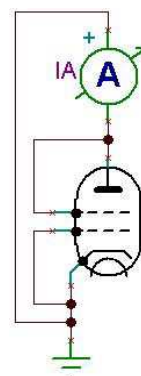
9. ábra



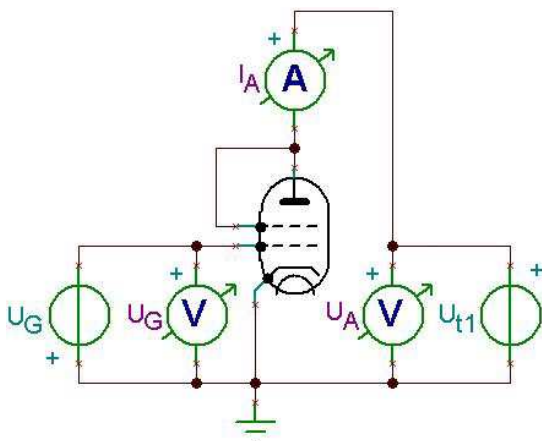
10. ábra



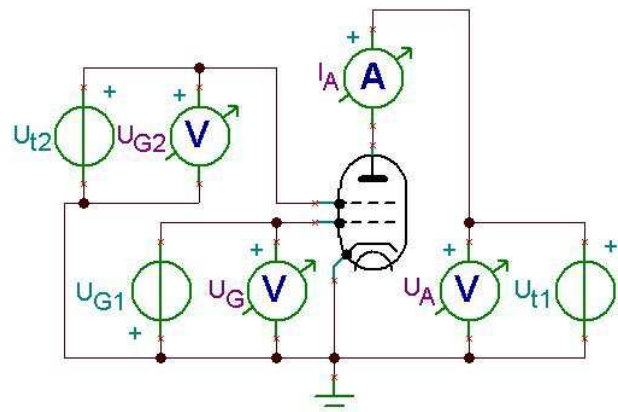
11. ábra



12. ábra



13. ábra



14. ábra