

- 1 c) Catodo, griglia, anodo. (Lezione 2)
- 2 a) La tensione sull'anodo è positiva, sulla griglia negativa. (Lezione 2, 3)
- 3 b) La corrente anodica aumenta. (Lezione 3)
- 4 a) La dipendenza della corrente anodica dalla tensione di griglia, per tensione anodica costante. (Lezione 9)

I triodi sono componenti elettronici non lineari. Il fatto, vero in generale, risulta chiaro in particolare osservando l'andamento globale delle curve caratteristiche. Se tuttavia potessimo limitarci ad un piccolo tratto della curva caratteristica o addirittura ad un singolo punto di lavoro sulla stessa, le cose andrebbero in modo diverso. Infatti, un piccolo tratto di curva caratteristica, complessivamente non lineare, può essere considerato pressochè rettilineo (lineare). Dipende dalle concrete condizioni in cui lavora il triodo il poter ammettere una simile semplificazione.

Le condizioni di lavoro base di un triodo sono in primo luogo fissate dalle tensioni applicate ai vari elettrodi, cioè dalla tensione anodica e dalla tensione di griglia, e dalla corrispondente corrente anodica. Se tornate a riguardare la Risposta 8 (risposta al quesito della Lezione 8), dalla famiglia di curve caratteristiche $I_A - U_A$ ivi riportate si può desumere che per una $U_A = 250$ V ed una $U_G = -2$ V si stabilisce una corrente anodica $I_A = 3,2$ mA. Le condizioni di lavoro del nostro triodo sono definite dai tre valori citati di U_A , U_G e I_A - nel diagramma della famiglia di caratteristiche anodiche tali valori individuano appunto un singolo punto, il *punto di lavoro*. Sinchè le tensioni e la corrente nel tubo non variano nel tempo, la posizione del punto di lavoro rimane immutata; lo definiamo in questo caso anche punto di lavoro a riposo.

Quando si impiegano i tubi elettronici, quindi anche i triodi, in genere tuttavia le tensioni e le correnti variano in funzione del tempo. Se ad es. alla griglia di un triodo applichiamo, oltre alla tensione continua di polarizzazione, anche una tensione alternata, si hanno corrispondenti variazioni della corrente anodica. Anche il punto di lavoro sulla curva caratteristica si sposterà dalla sua posizione di riposo, e si muoverà in qua ed in là in accordo con le variazioni di tensione e di corrente del triodo.

Domanda 12

In che differisce il concetto di "punto di lavoro a riposo" dal concetto generale di "punto di lavoro"?

- a) Per il numero di coordinate,
- b) per la dipendenza dei valori dal tempo,
- c) in nulla, i due concetti coincidono.

Si possono distinguere due tipi fundamentalmente distinti di condizioni di lavoro di un tubo elettronico:

1. *Le tensioni e le correnti nel tubo variano entro un intervallo relativamente grande.* In questo caso occorre tener conto della non-linearità delle curve caratteristiche. Il progetto d'un circuito con tubi elettronici deve basarsi sulla conoscenza delle curve caratteristiche, in pratica i calcoli saranno di tipo grafico-matematico.
2. *Le tensioni e le correnti applicate sono di valore relativamente elevato, e fissano un punto di lavoro a riposo del tubo; le tensioni alternate contemporaneamente applicate sono di piccola ampiezza.* Le condizioni di lavoro del tubo variano quindi relativamente di poco nel tempo; il tubo lavora solo entro un ristretto intervallo attorno al punto di lavoro a riposo. Allora è possibile considerare lineare questo piccolo intervallo di lavoro. In questo caso è pure possibile calcolare il funzionamento del tubo in modo relativamente semplice, in base a sole formule matematiche: si parla di "linearizzazione" della zona di lavoro.

Nel 2° caso, per la trattazione puramente numerica del comportamento dei tubi elettronici, dunque pure del triodo, vengono introdotti alcuni dati caratteristici del tubo. Questi dati caratteristici della tecnica dei tubi elettronici hanno le seguenti denominazioni:

pendenza (o conduttanza mutua, o trasconduttanza), s
 fattore di amplificazione, μ
 intraeffetto (o fattore di penetrazione), D
 resistenza interna (o anodica, o di placca), r_i

Domanda 13

Un amplificatore per un apparecchio di misura in campo medico è fornito di tubi elettronici. Il segnale d'ingresso all'amplificatore è di piccola ampiezza, il primo stadio provvede a "preamplificare" tale segnale; gli stadi successivi ricevono già un segnale di ampiezza maggiore. Il 1° stadio, di preamplificazione, è formato da un triodo. Per i calcoli di progetto per questo stadio di userà:

- a) un metodo puramente numerico,
- b) un metodo grafico basato sulla famiglia di curve caratteristiche?

Risposta 12

- b) Per la dipendenza dei valori dal tempo.

Risposta 13

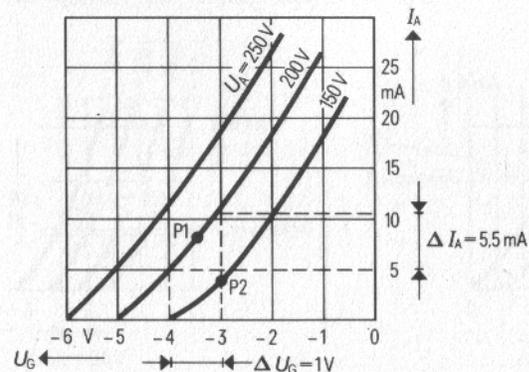
a) Si userà un metodo puramente numerico.

Suggerimenti per la risposta: Il 1° stadio d'amplificazione tratta solo piccoli segnali, ossia tensioni alternate. Il tubo elettronico relativo, nel nostro caso un triodo, opera quindi solo in una piccola zona della curva caratteristica. Possiamo considerare questa piccola zona, semplificando, come quasi-lineare, e quindi effettuare i calcoli solo per via numerica con i dati caratteristici del tubo.

In genere si parte dalla grandezza che nel calcolo si considera costante: nel caso della pendenza la tensione anodica U_A . Ogni curva caratteristica della famiglia $I_A - U_G$ viene determinata per un valore costante della tensione anodica; per il calcolo grafico della pendenza nel diagramma $I_A - U_G$ dobbiamo quindi muoverci lungo una curva caratteristica. Per il punto di lavoro P1 si tratta della curva relativa a $U_A = 200V$. Scegliamo un valore per una piccola variazione di tensione di griglia attorno al punto di lavoro, per esempio fra $U_G = -3V$ e $U_G = -4V$, per cui $\Delta U_G = 1V$. Come è mostrato nella figura, possiamo facilmente ricavare la variazione di corrente anodica che corrisponde a tale variazione di tensione di griglia: nel nostro caso è $\Delta I_A = 10,5 - 5 \text{ mA} = 5,5 \text{ mA}$, per cui:

$$s = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} = \frac{5,5 \text{ mA}}{1 \text{ V}} = 5,5 \text{ mA/V}$$

La pendenza viene usualmente indicata in mA/V (milliampere per V). Nel diagramma caratteristico $I_A - U_G$ la pendenza s rappresenta effettivamente il valore numerico della pendenza della curva (= a quello della tangente nel punto di lavoro). La pendenza s può essere ricavata anche dalla famiglia di caratteristiche anodiche, $I_A - U_A$.



Pendenza o conduttanza mutua

Lezione 14

La pendenza (o conduttanza mutua) di un tubo elettronico è definita dalla variazione ΔI_A di corrente anodica che viene provocata da una variazione ΔU_G della tensione di griglia, assumendo che la tensione anodica rimanga costante. Matematicamente si scrive:

$$s = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G}; \quad s = \frac{I_{A2} - I_{A1}}{U_{G2} - U_{G1}}; \quad U_A = \text{costante}$$

Col simbolo Δ s'intende una piccola variazione d'una grandezza. La pendenza di un tubo può essere derivata per via grafica dalle curve caratteristiche. Nella figura, dove è tracciata una parte della famiglia di curve caratteristiche $I_A - U_G$, il procedimento è illustrato con riferimento al punto di lavoro identificato da P1.

Domanda 14

Ricavate per il caso esemplificato la pendenza s del triodo in corrispondenza al punto di lavoro P2.

Risposta 14

La pendenza s nel punto di lavoro P2 vale (circa) 4,5 mA/V.

Per mettere in evidenza che per mantenere costante la corrente anodica le due variazioni devono essere di segno opposto, nella formula si è introdotto più correttamente il segno $-$, per cui

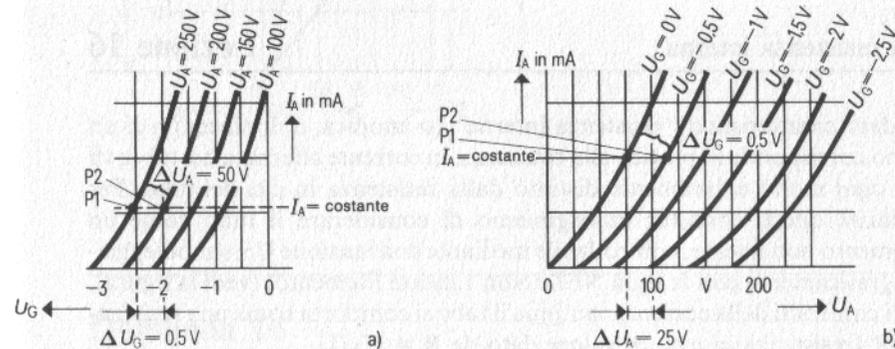
$$\mu = -\frac{\Delta U_A}{\Delta U_G}; \text{ per } I_A \text{ costante.}$$

Talvolta al posto del fattore di amplificazione μ viene indicato il suo reciproco, il cosiddetto intraeffetto (o fattore di penetrazione) D:

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{\Delta U_G}{\Delta U_A}; \text{ con } I_A \text{ costante.}$$

Il fattore di amplificazione μ come l'intraeffetto sono valori adimensionali (senza dimensione); talvolta D è espresso in %.

Sia μ che D possono facilmente essere ricavati dal diagramma delle curve caratteristiche. Anche per questa costruzione grafica partiamo dal valore che resta costante, qui dunque I_A . Un valore costante di corrente anodica corrisponde sia nel diagramma $I_A - U_A$ che in quello $I_A - U_G$ ad una linea orizzontale; i punti d'intersezione di tale linea con le curve caratteristiche interessate forniscono facilmente i corrispondenti valori di ΔU_A e ΔU_G . La relativa costruzione grafica è illustrata in figura a per il diagramma $I_A - U_A$, in figura b per il diagramma $I_A - U_G$.



Fattore di amplificazione

Lezione 15

Il fattore di amplificazione μ indica la variazione della tensione anodica, ΔU_A , provocata da una variazione ΔU_G della tensione di griglia, per un valore costante di corrente anodica. Matematicamente si tratta del rapporto $\Delta U_A / \Delta U_G$ per I_A costante.

Domanda 15

Il fattore di amplificazione μ per un dato punto di lavoro di un triodo vale $\mu = 50$. Qual'è il valore dell'intraeffetto del triodo in corrispondenza al medesimo punto di lavoro?

Risposta 15

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{50} = 0,02 \quad \text{cioè in percentuale il valore di } D \text{ è il } 2\%.$$

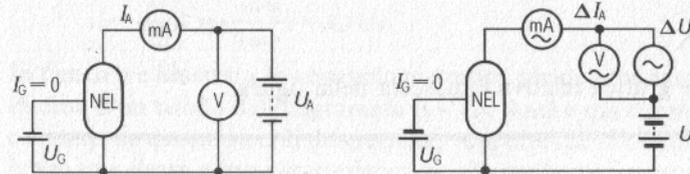
La resistenza interna

Lezione 16

Il dato caratteristico “resistenza interna” (o anodica, o di placca) r_i di un tubo corrisponde in pratica alla resistenza in corrente alternata del tubo; va ad ogni modo chiaramente distinto dalla resistenza in c.c. del tubo. Per chiarire questi concetti, immaginiamo di considerare il tubo come un elemento non lineare, controllabile mediante una tensione U_G , simboleggiato graficamente con la sigla NEL (Non Lineare Elemento) (vedi la figura). Nei confronti della corrente continua il tubo si comporta come una resistenza R (resistenza in c.c.) di valore dato da $R = U_A/I_A$.

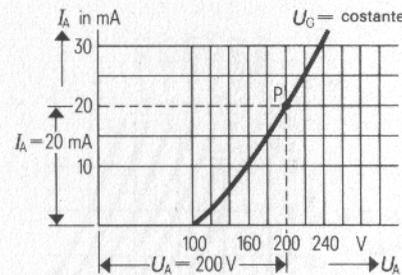
Se al tubo si applica in aggiunta una tensione elettrica alternata (ΔU_A in figura b), e, mediante un adatto strumento, che reagisce solo alla corrente alternata, si misura la corrente alternata ΔI_A che scorre entro il tubo, si può dire che per la corrente alternata il tubo funziona come una resistenza in c.a.

$$r_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}; \quad \text{con } U_G \text{ costante}$$



a) $R = \frac{U_A}{I_A}$

b) $r_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$



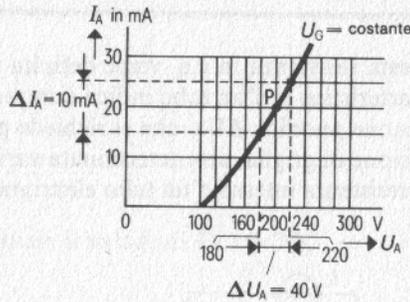
c) $R = \frac{200 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega$

Domanda 16

Nella figura c è indicato come si possa ricavare, data la curva caratteristica anodica d'un elemento non lineare, la resistenza in corrente continua R per un dato punto di lavoro; nell'esempio si ha $R = 10 \text{ k}\Omega$. Provate ora a determinare il valore della resistenza interna r_i nel medesimo punto di lavoro. Partite ad es. da un valore $\Delta U_A = 40 \text{ V}$. Quanto vale r_i per questo esempio?

Risposta 16

$$r_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{40 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 4 \text{ k}\Omega$$

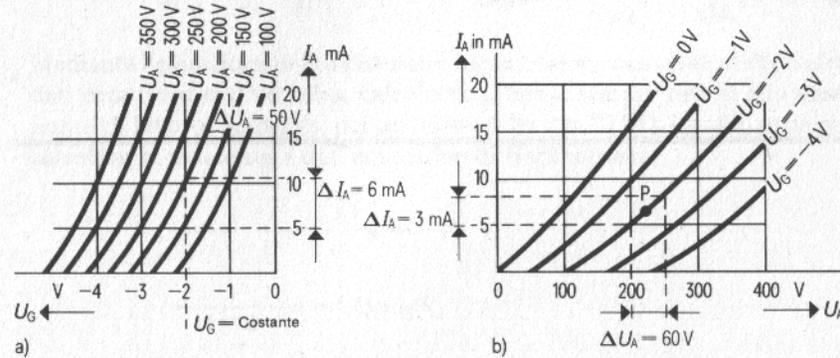


La costruzione grafica relativa è indicata nella figura.

In figura ad es. è indicata per $U_G = -2\text{V}$. Le intersezioni di questa retta con le curve caratteristiche prossime corrispondenti a valori diversi di U_A (nell'esempio si sono presi $U_A = 200$ e $U_A = 150\text{V}$) definiscono la variazione di tensione anodica ΔU_A , da un lato (qui $\Delta U_A = 200 - 150 = 50\text{V}$), e contemporaneamente consentono di ricavare la corrispondente variazione di corrente anodica ΔI_A (qui corrispondente a circa 6 mA). Si calcola ora:

$$r_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{50 \text{ V}}{6 \text{ mA}} = 8,3 \text{ k}\Omega$$

In figura b è illustrata la costruzione grafica per determinare la resistenza interna d'un triodo dal diagramma $I_A - U_A$. Anche qui consideriamo $U_G = \text{costante}$: su questo tipo di diagramma, vuol dire che ci dobbiamo muovere lungo una stessa curva caratteristica, quella per la data tensione U_G . Fissiamo un valore modesto per la variazione ΔU_A attorno al punto di lavoro, per il quale vogliamo determinare la resistenza interna r_i ; la figura mostra il modo di procedere per ricavare la corrispondente variazione di corrente anodica ΔI_A .



Come si ricava la r_i dalle curve caratteristiche

Lezione 17

La resistenza in c.c. e quella in c.a. d'un elemento non lineare, quindi pure di un tubo elettronico, in genere sono differenti fra loro, e si deve prestare attenzione a non confonderli.

Torniamo ora al dato caratteristico "resistenza interna r_i " del triodo. Come detto, può essere ricavato dalle famiglie di curve caratteristiche di ambo i tipi. In figura a è indicata la relativa costruzione per il diagramma caratteristico $I_A - U_G$ d'un triodo. Partiamo al solito dalla grandezza che viene mantenuta costante, nel nostro caso dunque U_G . Nel diagramma $I_A - U_G$ un valore costante di U_G è rappresentato da una linea verticale.

Domanda 17

Qual'è il valore corretto della resistenza interna del triodo le cui curve caratteristiche sono mostrate in figura b, nel punto P:

- a) 500Ω ,
- b) $2,5 \text{ k}\Omega$,
- c) $5 \text{ k}\Omega$,
- d) $20 \text{ k}\Omega$.