

## **Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi**

---

# **Oscillatori: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi**

La polarizzazione degli oscillatori a tre punti per alta frequenza .....	2
Polarizzazione degli oscillatori Colpitts .....	2
Colpitts con BJT.....	2
Colpitts con JFET.....	7
Polarizzazione degli oscillatori Hartley .....	10
Hartley con BJT.....	10
Hartley con JFET.....	12
Conclusioni.....	14
Gli oscillatori controllati in tensione.....	15
La stabilità di frequenza di un oscillatore.....	23
Come si esprime la variazione di frequenza.....	27
La stabilità dell' oscillatore LC.....	28
Oscillatori RC.....	29
Considerazioni sulla stabilità di frequenza.....	30
Gli oscillatori a cristallo.....	33
Generalità.....	33
Cristalli piezoelettrici.....	33
I circuiti degli oscillatori a cristallo.....	38
Frequenza fondamentale e frequenze armoniche .....	39

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### La polarizzazione degli oscillatori a tre punti per alta frequenza

I metodi di polarizzazione normalmente usati negli amplificatori possono essere usati per polarizzare gli elementi attivi negli oscillatori a tre punti (figura 1). I circuiti dinamici di questi oscillatori prescindono dal tipo di connessione del transistor (emettitore comune, base comune, ...), ma generalmente si ha:

- Punto 1, ingresso dell'amplificatore (base, emettitore, gate, source). Dal punto di vista del segnale è un punto caldo.
- Punto 2, uscita dell'amplificatore (collettore, emettitore, drain, source). Dal punto di vista del segnale è un punto caldo.
- Punto 3, punto comune (collettore, base, emettitore, drain, gate, source). Dal punto di vista del segnale è un punto freddo.

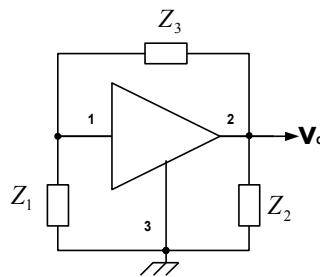


Figura 1

Nelle note che seguono si prenderanno in considerazione gli oscillatori Colpitts ed Hartley con BJT e JFET.

I circuiti dinamici riportati nella presente nota non tengono conto dei parametri dei transistori ( $r_\pi, r_x, r_0, r_d, C_\pi, C_\mu$ ) e del carico  $R_L$ .

### Polarizzazione degli oscillatori Colpitts

#### Colpitts con BJT

Si parte dal circuito dinamico dell'oscillatore Colpitts (figura 2)

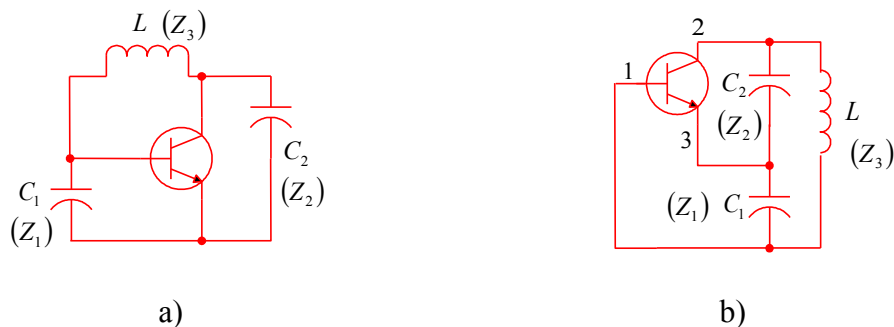


Figura 2

I due circuiti dinamici di figura 2 sono uguali, solamente il secondo è stato disegnato in modo più adatto per disegnare il circuito di polarizzazione.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### *Emettitore comune*

Il punto 3 o punto comune è l'emettitore

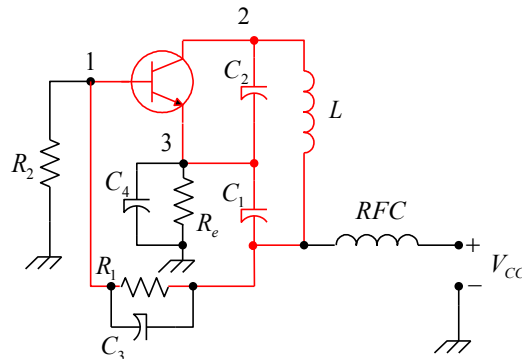


Figura 3

I componenti aggiunti al circuito dinamico di figura 2 sono:

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_3$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_1$ , in pratica il gruppo  $R_1 // C_3$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- $C_4$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_e$ , in pratica il gruppo  $R_e // C_4$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- $RFC$ , induttanza di blocco a radio frequenza, serve a far sì che il circuito di alimentazione (batteria) sia disaccoppiato dal circuito dell'oscillatore.  $RFC$  alla frequenza di lavoro deve avere una reattanza elevata.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ . Si considera che la sorgente di alimentazione sia una sorgente ideale di tensione continua e che quindi ha una impedenza interna nulla, in pratica si fa sì che questa impedenza sia molto bassa nella gamma delle frequenze in gioco.

Per calcolare i valori dei condensatori di fuga si usa la seguente regola empirica

$$X_C \leq \frac{R}{10}$$

la reattanza va calcolata alla più bassa frequenza di oscillazione, dove  $R$  può essere  $R_e$  oppure  $R_1$ .

Il valore della reattanza  $RFC$  si può determinare fissando

$$X_{RFC} \geq 3 \div 5 |Z|$$

dove  $|Z|$  è l'impedenza del circuito nel punto in cui è connessa la  $RFC$ .

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Il segnale di uscita può essere prelevato tramite un avvolgimento secondario su l'induttanza  $L$  oppure dal collettore, punto 2, tramite una capacità di blocco della corrente continua.

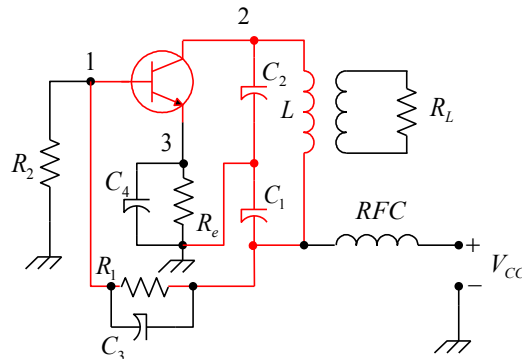


Figura 4

La figura 4 mostra un circuito del tutto simile a quello della figura 3 con la sola differenza nella connessione del **punto 3**. Nella figura 3 i condensatori  $C_1$  e  $C_2$  sono connessi al punto freddo (a massa) tramite il condensatore  $C_4$ , mentre nella figura 4 lo sono direttamente. Nello schema è rappresentato un dei possibili modi di applicare il segnale generato dall'oscillatore al carico  $R_L$ .

A causa della polarizzazione il circuito dinamico si modifica (figura 5), la resistenza del partitore di base  $R_2$  viene a trovarsi in parallelo a  $C_1$ .

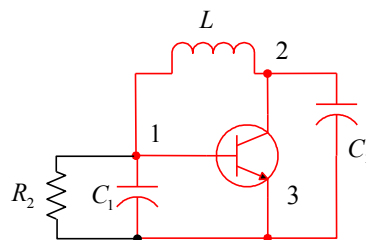


Figura 5

### Base comune

Il punto 3 (freddo o comune) è la base

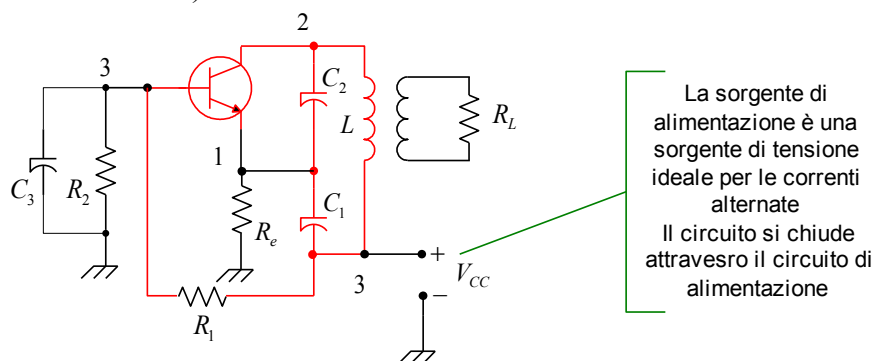


Figura 6

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

I componenti aggiunti al circuito dinamico di figura 2 sono:

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_3$ , condensatore di fuga, serve a rendere “fredda” la base alla frequenza di oscillazione, in pratica il gruppo  $R_1 // R_2 // C_3$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ . Da tenere presente che alla frequenza di lavoro la sorgente  $V_{CC}$  può essere considerata un corto circuito per le correnti alternate.

Per calcolare i valori del condensatore di fuga  $C_3$  si usa la seguente regola empirica

$$X_{C3} \leq \frac{R_1 // R_2}{10}$$

la reattanza va calcolata alla più bassa frequenza di oscillazione.

Il circuito dinamico tiene conto di  $R_e$  ed è (figura 7)

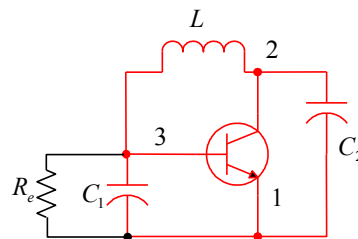


Figura 7

Per evitare l'effetto della  $R_e$  in parallelo a  $C_1$  si può inserire in serie alla resistenza di emettitore  $R_e$  una impedenza di blocco a RF (RFC) (figura 8 a); la reattanza  $X_{RFC}$  dovrà essere almeno 10 volte il valore di  $R_e$  alla più bassa frequenza di lavoro.

Nella figura 8 a è mostrato uno dei modi di prelevare il segnale dell'oscillatore per applicarlo al carico  $R_L$ .

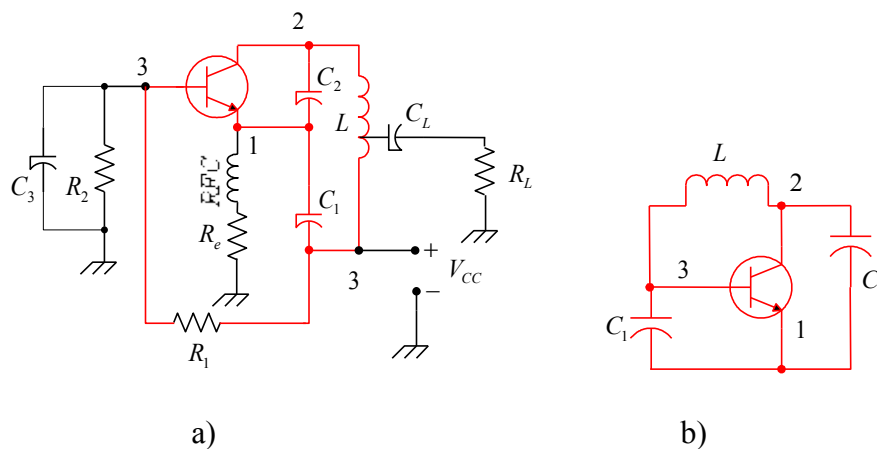


Figura 8

L'impedenza RFC isola il punto 1 dalla  $R_e$  rendendo trascurabile la sua influenza sull'oscillatore, il circuito dinamico diventa come in figura 8 b.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Collettore comune

Il punto 3 (freddo o comune) è il collettore

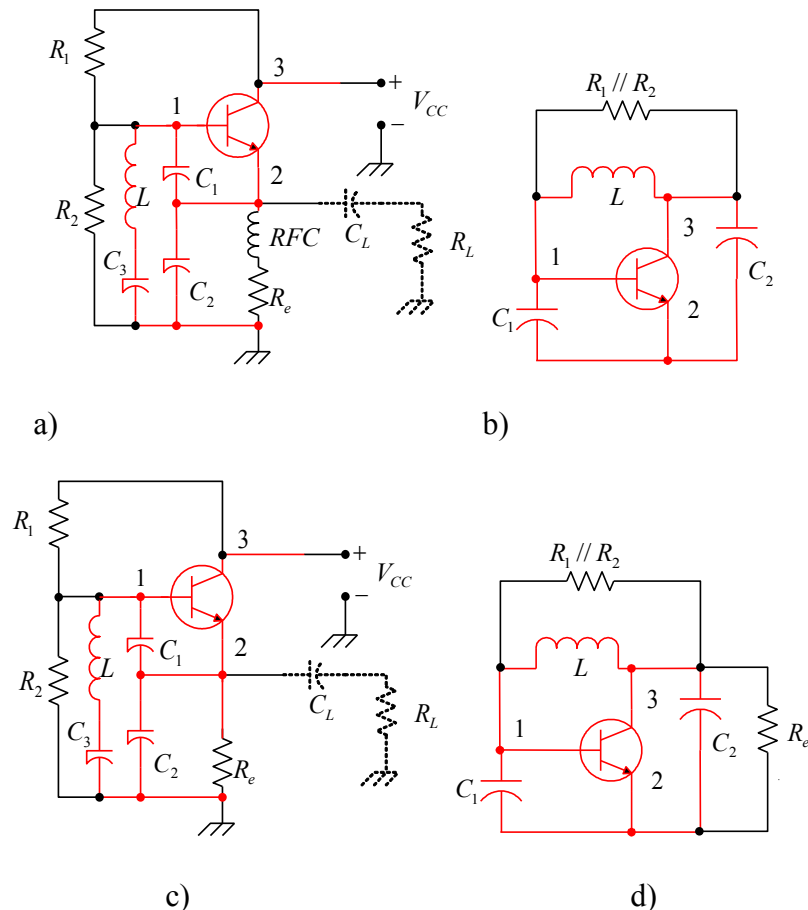


Figura 9

I componenti aggiunti al circuito dinamico di figura 2 sono:

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_3$ , condensatore di blocco della corrente continua, serve ad evitare che l'induttanza  $L$  cortocircuiti verso massa la base, deve essere un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- $RFC$ , induttanza di blocco a radio frequenza, serve ad isolare alla frequenza di lavoro la resistenza di emettitore  $R_e$  (punto 2),
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ . Da tenere presente che alla frequenza di lavoro la sorgente  $V_{CC}$  deve essere progettata in modo rappresentare un corto circuito per le correnti alternate.

Le figure 9 a e 9 b mostrano il circuito dell'oscillatore ed il suo circuito dinamico rispettivamente. Il circuito dinamico differisce da quello della figura 2 per la presenza di

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

$R_B = R_1 // R_2$  in parallelo alla induttanza  $L$ ,  $R_B$  influirà sul fattore di merito della induttanza abbassandolo. Nello schema di figura 9 c è stata tolta la induttanza di blocco  $RFC$  a radio frequenza e quindi il punto 2 non è più “isolato” da  $R_e$  in corrente alternata, si deve quindi tenerne conto nel disegno del circuito dinamico, figura 9 d .

### Colpitts con JFET

Si parte dal circuito dinamico dell'oscillatore Colpitts con JFET (figura 10a)

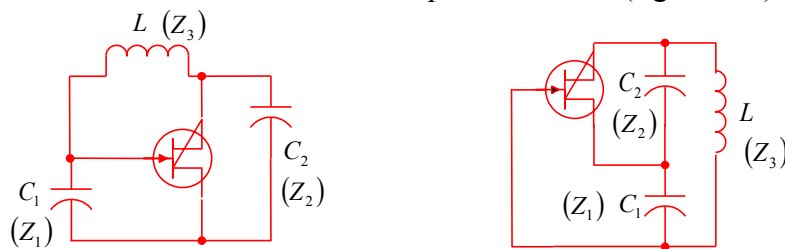


Figura 10a

### Source comune

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è il source

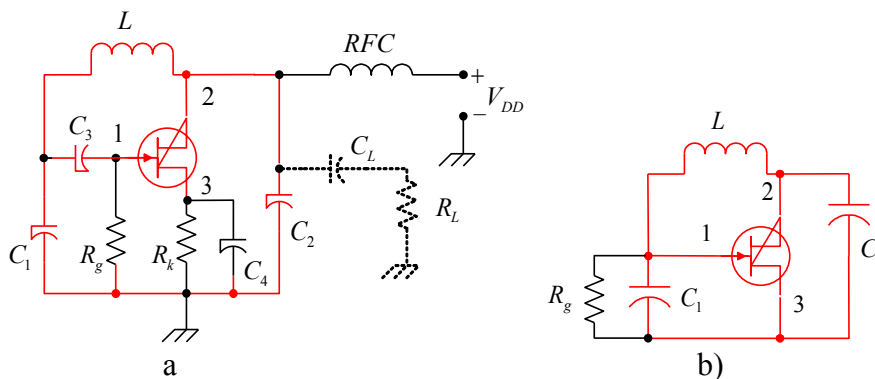


Figura 10b

Rispetto al circuito dinamico di figura 10a sono stati aggiunti i seguenti componenti aggiunti:

- $R_g$  resistenza di polarizzazione del gate,
- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- $C_4$ , condensatore di fuga del source, annulla l'effetto della  $R_k$  alla frequenza di lavoro, il source è il punto 3 e deve essere a massa alla frequenza di lavoro,
- $C_3$ , condensatore di blocco della corrente continua. Impedisce che il gate ed il source siano connessi in corrente continua. La sua reattanza, alla frequenza di lavoro, deve essere trascurabile, nei confronti delle altre impedenze.
- $RFC$ , induttanza di blocco a radio frequenza, serve far sì che il circuito di alimentazione sia disaccoppiato dal circuito dell'oscillatore (punto 2). Alla frequenza di lavoro la impedenza deve avere una reattanza elevata rispetto alla impedenza del punto 2,
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Il segnale fornito dall'oscillatore può essere prelevato la drain, punto 2, ed applicato al carico  $R_L$  tramite un condensatore di blocco della corrente continua  $C_L$ .

Per calcolare i valori del condensatore di fuga  $C_4$  si usa la seguente regola empirica,

$$X_{C4} \leq \frac{R_k}{10}$$

la reattanza va calcolata alla più bassa frequenza di oscillazione.

Il circuito dinamico viene modificato aggiungendo  $R_g$  in parallelo a  $C_1$ , fra i punti 1 ed il 3, figura 10b/b.

### Gate comune

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è il gate

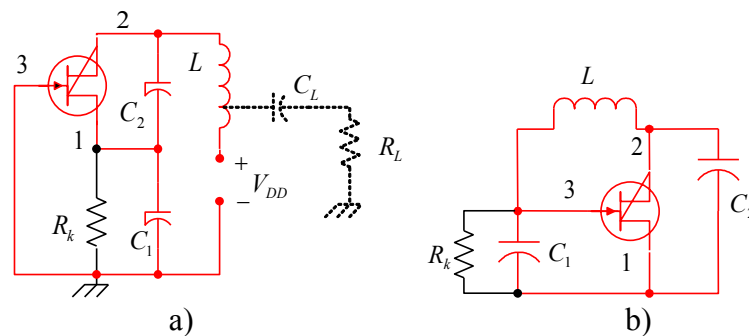


Figura 11

Rispetto al circuito dinamico di figura 9 sono stati aggiunti:

- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

Il circuito dinamico (figura 11 b) terrà conto della resistenza  $R_k$  connessa fra i punti 3 (gate) e 1 (source). L'effetto della  $R_k$  può essere ridotto o annullato inserendo in serie una impedenza di blocco a radio frequenza  $RFC$  (figure 12 a e 12 b)

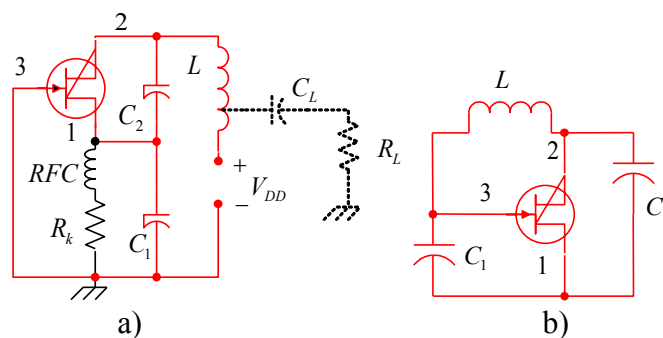


Figura 12

Il segnale fornito dall'oscillatore può essere prelevato tramite una presa sulla induttanza  $L$  ed applicato al carico  $R_L$  tramite un condensatore di blocco della corrente continua  $C_L$ .



## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Drain comune

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è il drain

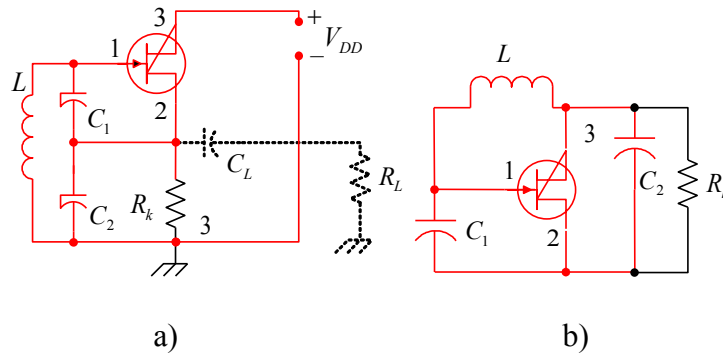


Figura 13

Rispetto al circuito dinamico di figura 9 sono stati aggiunti:

- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

Il circuito dinamico (figura 13 b) terrà conto della resistenza  $R_k$  connessa fra i punti 3 (drain) e 2 (source). L'effetto della  $R_k$  può essere ridotto o annullato inserendo in serie una impedenza di blocco a radio frequenza  $RFC$  (figure 14 a e 14 b)

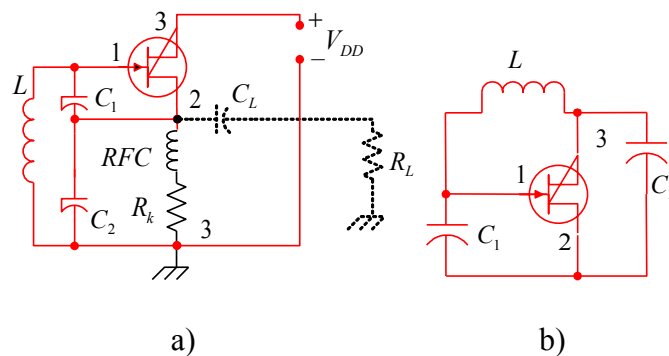


Figura 14

Il segnale fornito dall'oscillatore può essere prelevato dal source.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Polarizzazione degli oscillatori Hartley

#### Hartley con BJT

Per studiare la polarizzazione dell'oscillatore Hartley si parte, come si è fatto per l'oscillatore Colpitts, dal circuito dinamico (figura 15)

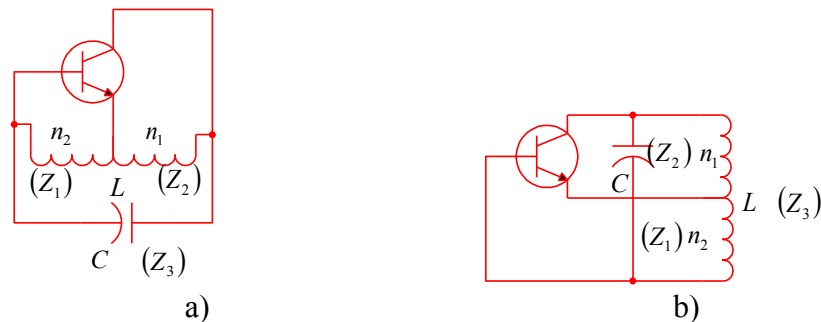


Figura 15

#### *Emettitore comune*

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è l'emettitore

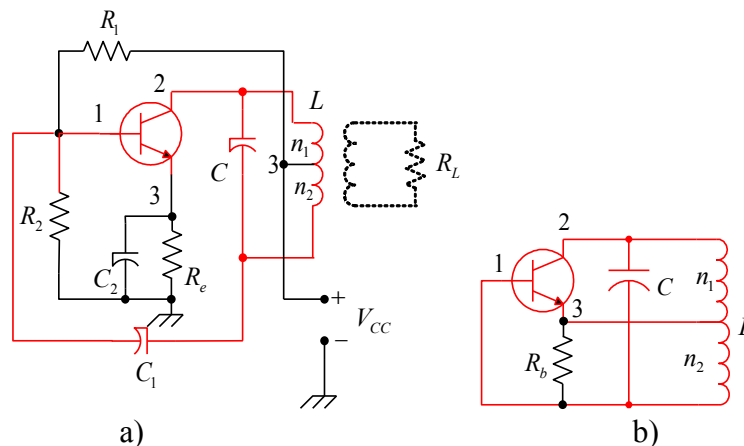


Figura 16

I componenti aggiunti al circuito dinamico di figura 15 sono (figura 16 a):

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_1$ , condensatore di blocco della corrente continua, evita che la  $V_{CC}$  venga applicata direttamente alla base, la sua reattanza deve essere trascurabile nei confronti della impedenza di base,
- $C_2$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_e$ , in pratica il gruppo  $R_e // C_2$  è un corto circuito per le corrente alternate alla frequenza di lavoro.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

• Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ .  
Il circuito dinamico è riportato in figura 16 b) e si differisce da quello di partenza (figura 15) per la presenza fra i punti 1 e 3 della resistenza  $R_b = R_1 // R_2$ .

### Base comune

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è la base

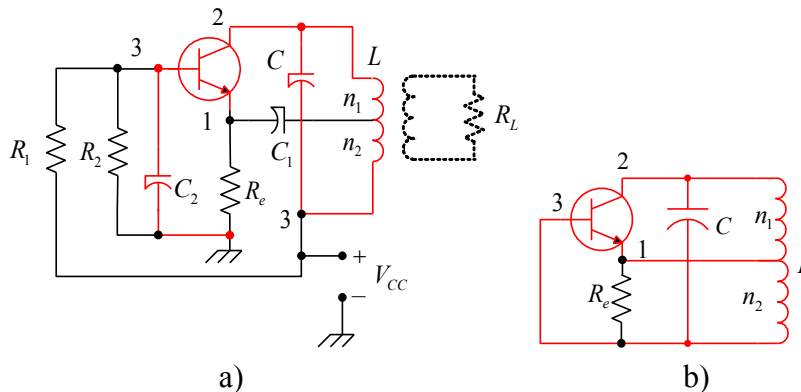


Figura 17

Rispetto al circuito dinamico di figura 15 sono stati aggiunti i componenti per la polarizzazione (figura 17 a):

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_1$ , condensatore di blocco della corrente continua, evita che la  $V_{CC}$  venga applicata direttamente all'emettitore, la sua reattanza deve essere trascurabile nei confronti della impedenza di emettitore (in pratica  $R_e$ ),
- $C_2$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_b = R_1 // R_2$ , in pratica il gruppo  $R_b // C_2$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ .

Il circuito dinamico è riportato in figura 17 b) e si differisce da quello di partenza (figura 15) per la presenza fra i punti 1 (emettitore) e 3 (base) della resistenza  $R_e$ .

### Collettore comune

Il punto 3, punto freddo o punto comune, è il collettore

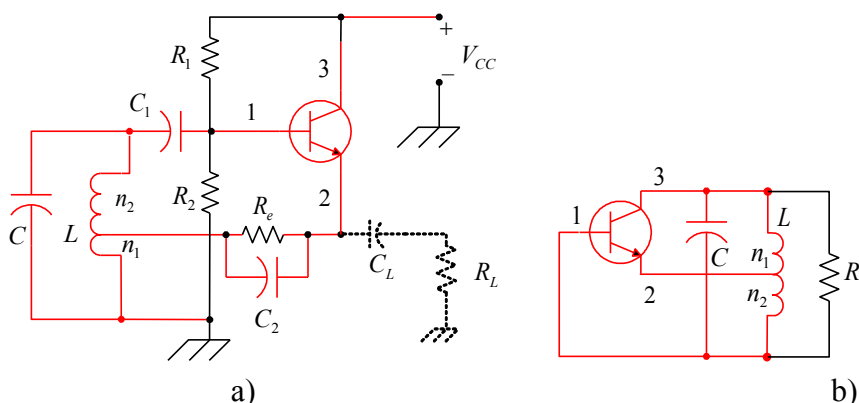


Figura 18

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Rispetto al circuito dinamico di figura 15 sono stati aggiunti i componenti per la polarizzazione (figura 18 a):

- $R_1$  ed  $R_2$  che costituiscono il partitore di polarizzazione della base,
- $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- $C_1$ , condensatore di blocco della corrente continua, evita che la tensione di polarizzazione della base sia cortocircuitata verso massa dalla induttanza  $L$ , la sua reattanza deve essere trascurabile nei confronti della impedenza di base,
- $C_2$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_e$ , in pratica il gruppo  $R_e // C_2$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{CC}$ .

Il circuito dinamico è riportato in figura 18 b) e si differisce da quello di partenza (figura 15) per la presenza fra i punti 1 (base) e 3 (collettore) della resistenza  $R_b = R_1 // R_2$ .

### Hartley con JFET

Per studiare la polarizzazione dell'oscillatore Hartley con JFET si parte, come si è fatto nei casi precedenti, dal circuito dinamico (figura 19)

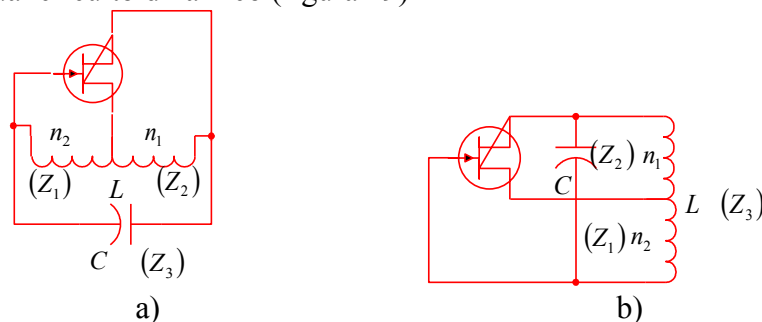


Figura 19

### Source comune

Il source è il punto 3, punto freddo o punto comune.

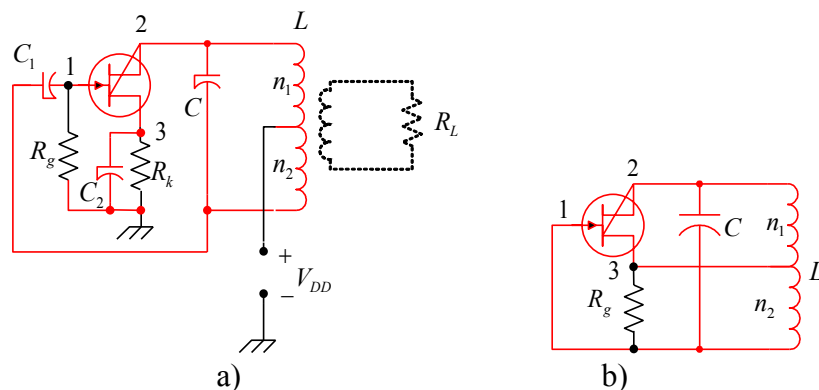


Figura 20

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

I componenti aggiunti, rispetto al circuito dinamico di figura 19, sono (figura 20 a):

- $R_g$ , resistenza di polarizzazione del gate
- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- $C_1$ , condensatore di blocco della corrente continua, evita che la tensione di alimentazione venga applicata al gate, la sua reattanza deve essere trascurabile nei confronti della impedenza del circuito del gate (in pratica  $R_g$ ),
- $C_2$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_k$ , in pratica il gruppo  $R_k // C_2$  è un corto circuito per le corrente alternate alla frequenza di lavoro.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

Il circuito dinamico è riportato in figura 20 b) e si differisce da quello di partenza (figura 19) per la presenza fra i punti 1 (gate) e 3 (source) della resistenza  $R_g$ .

### Gate comune

Il gate è il punto 3, punto freddo o punto comune.

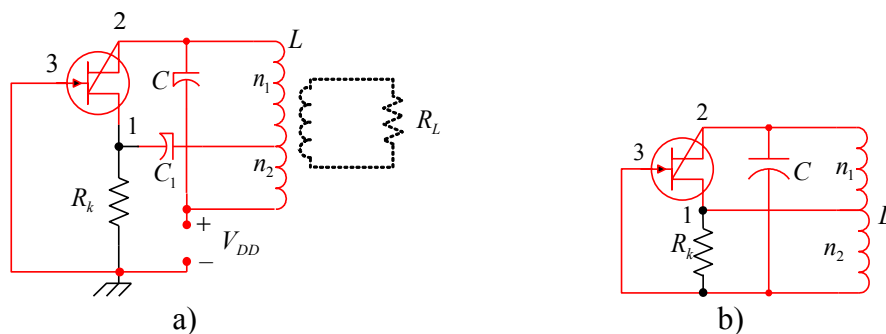


Figura 21

I componenti aggiunti, rispetto al circuito dinamico di figura 19, sono (figura 21 a):

- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- $C_1$ , condensatore di blocco della corrente continua, evita che la tensione di alimentazione venga applicata al source, la sua reattanza deve essere trascurabile nei confronti della impedenza del circuito del gate (in pratica  $R_k$ ),
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

Il circuito dinamico è riportato in figura 20 b) e si differisce da quello di partenza (figura 19) per la presenza fra i punti 3 (gate) e 1 (source) della resistenza  $R_k$ .

L'effetto della resistenza  $R_k$  può essere annullato inserendo in serie, fra  $R_k$  ed il nodo del punto 1, una impedenza di blocco a RF, come nel caso dell'oscillatore Colpitts di figura 8.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### **Drain comune**

Il drain è il punto 3, punto freddo o punto comune.

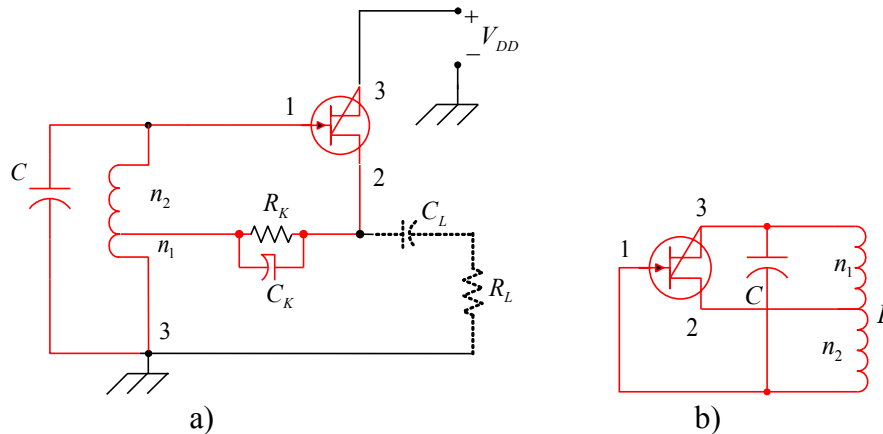


Figura 22

I componenti aggiunti, rispetto al circuito dinamico di figura 19, sono (figura 22 a):

- $R_k$ , resistenza di polarizzazione del source,
- $C_k$ , condensatore di fuga, serve ad annullare, alla frequenza di oscillazione, la resistenza  $R_k$ , in pratica il gruppo  $R_k // C_k$  è un corto circuito per le correnti alternate alla frequenza di lavoro.
- Il circuito di alimentazione rappresentato dalla sorgente in corrente continua  $V_{DD}$ .

Il circuito dinamico è riportato in figura 20 b) non differisce da quello di partenza della figura 19.

### **Conclusioni**

Le note contenute in questo documentano mostrano solamente alcuni dei tanti possibili circuiti di polarizzazione.

Sono stati anche illustrati alcuni modi di prelevare il segnale fornito dall'oscillatore.

I circuiti dinamici disegnati tengono conto solamente dei componenti relativi al circuito di polarizzazione e non tengono conto del carico e dei parametri del transistor; questi ultimi dovranno essere presi o meno in considerazione a seconda del tipo di oscillatore che si va a progettare, della frequenza di lavoro, del carico e del tipo di transistor.

La sorgente di alimentazione va sempre considerata come un punto freddo (punto 3).

### **Riferimenti**

M.Gasparini, D. Mirri, **Dispositivi e circuiti elettronici VOL II**, Calderini 1989

## **Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi**

---

### **Gli oscillatori controllati in tensione**

Un oscillatore è normalmente progettato per generare un segnale che varia in frequenza entro una certa banda. Tipico è il caso dell'oscillatore locale di un ricevitore supereterodina; per esempio in un ricevitore FM che riceve segnali nella banda da 88 MHz a 108 MHz ed in cui il valore della media frequenza è di 10,7 MHz, l'oscillatore locale dovrà poter variare la sua frequenza da un valore minimo di  $88 + 10,7$  MHz ad un valore massimo di  $108 + 10,7$  MHz.

La variazione di frequenza negli oscillatori LC viene generalmente ottenuta variando uno di questi due componenti tramite una induttanza variabile e rispettivamente tramite un condensatore variabile. Ambedue sono state usate in passato nei cosiddetti VFO (Variable Frequency Oscillator) e lo sono ancora là dove la stabilità di frequenza richiesta non è molto alta, come ad esempio nei ricevitori commerciali di modesta qualità.

Oggi è possibile ottenere dei generatori di segnali molto stabili in frequenza realizzando quei sistemi denominati *sintetizzatori di frequenza*, questi sono dei blocchi funzionali di notevole complessità, che oggi, grazie al progresso nell'integrazione del silicio, sono di dimensioni e costi contenuti. Una tecnica per realizzare i sintetizzatori è quella dell'anello di aggancio in fase (PLL, Phased Locked Loop), l'oscillatore variabile in frequenza è un importante sottoinsieme del PLL.

In questo tipo di oscillatore il controllo della frequenza avviene di solito tramite una tensione continua. Questo oscillatore viene chiamato VCO (Voltage Controlled Oscillator).

Questi oscillatori usano come elemento di controllo in funzione della tensione la capacità,  $C$ . Capacità che viene resa variabile grazie all'impiego di un diodo al silicio di tipo particolare, diodo che viene chiamato con nomi diversi:

- varicap,
- varactor,
- voltage variable capacitance diode,

in questo contesto useremo il termine *varicap*.

In una giunzione PN la polarizzazione inversa fa sì che i portatori di maggioranza si allontanino dalla giunzione, producendo un aumento di carica spaziale, cioè lo spessore dello strato di carica spaziale alla giunzione aumenta con l'aumentare della tensione inversa. Questo aumento di cariche con la tensione può essere considerato come un effetto capacitivo. Più grande è la tensione inversa, più grande è la larghezza della regione di carica spaziale e quindi minore è la capacità.

La figura 1 mostra in modo qualitativo quanto appena sommariamente descritto.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

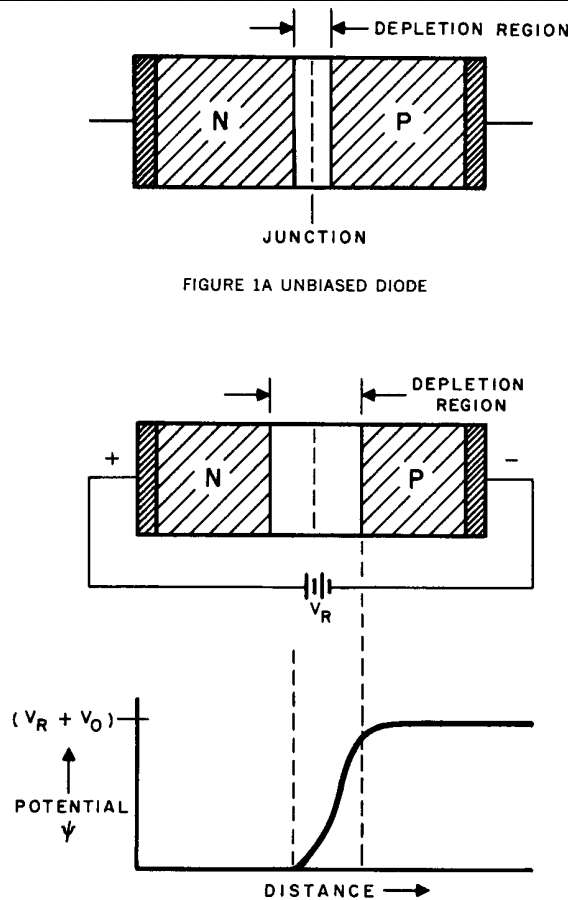


Figura 1 Giunzione PN polarizzata inversamente

Si dimostra teoricamente e sperimentalmente che la capacità della giunzione di un diodo polarizzato inversamente segue questa relazione:

$$C = \frac{K}{(V_R + V_0)^n} \quad \text{Dove :}$$

$C$  , capacità della giunzione

$V_R$  , tensione di polarizzazione inversa,

$K$  ,  $V_0$  e  $n$  , sono costanti che dipendono dalla tecnologia con cui è costruito la giunzione PN del diodo.

L'esponente  $n$  determina la pendenza della caratteristica *capacità/tensione* e dipende dal tipo di drogaggio della giunzione , varia da **0,33 a 0,5**.

$K$  dipende dai materiali con cui è fatto il diodo e dall'area della giunzione ed è il valore della capacità del diodo quando  $V_R + V_0 = 1$ .



## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

La figura 2 mostra il circuito equivalente di un diodo varicap, dove:

- a)  $C$ , capacità della giunzione che varia in funzione della polarizzazione,
- b)  $R_p$ , è la resistenza di perdita del diodo polarizzato inversamente, è quella resistenza che tiene conto della corrente di perdita dovuta alla polarizzazione inversa.
- c)  $R_s$ , è la resistenza che tiene conto delle perdite in serie. Queste sono la resistenza dei conduttori, la resistenza di contatto e la resistenza del materiale semiconduttore esterno alla zona di carica spaziale.
- d)  $V_0$ , è il potenziale di diffusione, va inserito nel circuito equivalente solamente per tenerne conto in caso di studio sulla stabilizzazione termica.
- e)  $C_d$ , è la capacità del contenitore,
- f)  $L$ , è l'induttanza dei terminali.

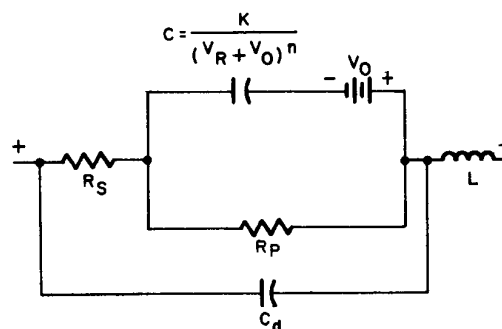
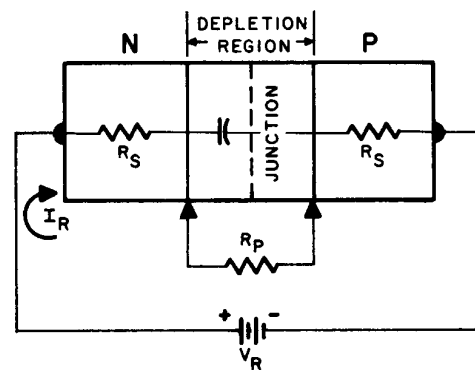


Figura 2 Circuito equivalente di un diodo a capacità variabile

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Il campo di variazione di un diodo a capacità variabile è definito da:

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{C_{\text{tot}}(V_{R\min})}{C_{\text{tot}}(V_{R\max})}$$

ed è limitato dal fatto che il diodo varicap non può lavorare con una tensione alternata sovrapposta nelle condizioni di:

- polarizzazione diretta
- polarizzazione inversa nella regione di breakdown.

Si deve anche verificare che il diodo non si comporti da diodo raddrizzatore della corrente alternata sovrapposta.

La tabella che segue riporta le caratteristiche di alcuni diodi a variazione di capacità reperibili in commercio:

Capacità	MV209	BB105	MVAM125
a $V_R = 1\text{ V}$	40 pF	18 pF	500pF
a $V_R = 25\text{ V}$	6 pF	2 pF	33 pF
rapporto di capacità usabile	6	9	15

I diodi a capacità variabile si possono inserire nei circuiti risonanti come un qualsiasi condensatore, va però tenuto conto degli aspetti di polarizzazione del varicap e dell'impatto del circuito di polarizzazione sul circuito risonante stesso.

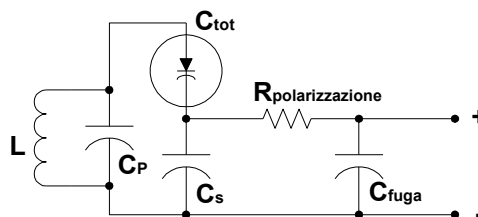


Figura 3 Circuito risonante parallelo con diodo capacità variabile e con la resistenza di polarizzazione in parallelo al condensatore in serie.

Nel circuito di figura 3 la resistenza di polarizzazione viene a trovarsi, dal punto di vista dinamico, in parallelo alla capacità  $C_s$ ; darà luogo ad una resistenza in parallelo alla resistenza di perdita parallelo del circuito risonante (abbasserà il Q). Il valore di questa resistenza aggiuntiva di perdita del circuito risonante dipende dalla frequenza.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

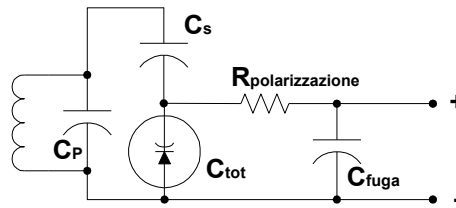


Figura 4 Circuito risonante parallelo con diodo a capacità variabile e con la resistenza di polarizzazione inserita in parallelo al diodo

Nel circuito di figura 4 la resistenza di polarizzazione viene a trovarsi, dal punto di vista dinamico, in parallelo al diodo a capacità variabile, l'effetto sarà lo stesso del circuito della figura 3.

Anche nel caso della figura 5 la resistenza di polarizzazione darà un contributo alla riduzione del fattore di merito ma a differenza dei due casi precedenti sarà indipendente dalla frequenza.

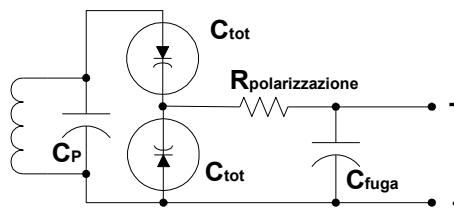


Figura 5 Circuito risonante parallelo con due diodi a capacità variabile

L'effetto della resistenza di polarizzazione può essere attenuato connettendo in serie alla resistenza stessa una impedenza di blocco alla radio frequenza che presenti una reattanza elevata alla minima frequenza di funzionamento.

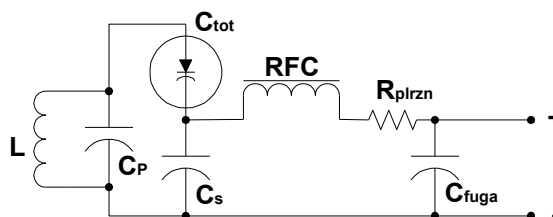


Figura 6 Circuito risonante parallelo con diodo a capacità variabile e con circuito di polarizzazione composta da una resistenza e da una reattanza induttiva di blocco per le correnti alternate a radio frequenza

L'induttanza di blocco in serie alla resistenza di polarizzazione,  $RFC$ , va scelta con cura, si deve evitare che essa presenti fenomeni di auto risonanza nella gamma di frequenza di lavoro. Considerando che nel circuito non scorre corrente si potrebbe eliminare dal circuito la resistenza di polarizzazione, di solito non la si toglie in quanto serve a smorzare li fenomeni di auto risonanza di  $RFC$ .

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Nella figura 7 è riportato lo schema del circuito dinamico di un oscillatore Colpitts, da questo schema attraverso alcuni passaggi ricaveremo lo schema elettrico di un oscillatore Colpitts controllato in tensione, di un VCO.

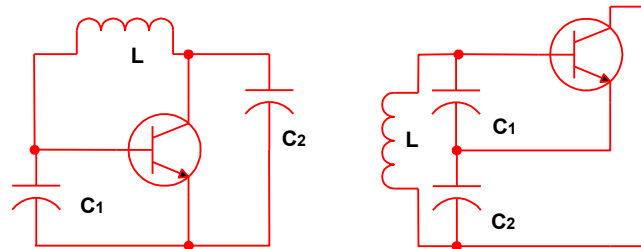


Figura 7 Circuito dinamico di un oscillatore Colpitts con BJT

Lo schema di figura 8 riporta il circuito dinamico di figura 7 con aggiunto il circuito di polarizzazione. Il transistore BJT è inserito nella configurazione collettore comune ed i componenti aggiunti sono:

- b)  $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore,
- c)  $R_1$  &  $R_2$ , partitore di polarizzazione della base
- d)  $C_3$ , condensatore di blocco della corrente continua, impedisce che la base e sia messa a massa dalla bobina  $L$ .

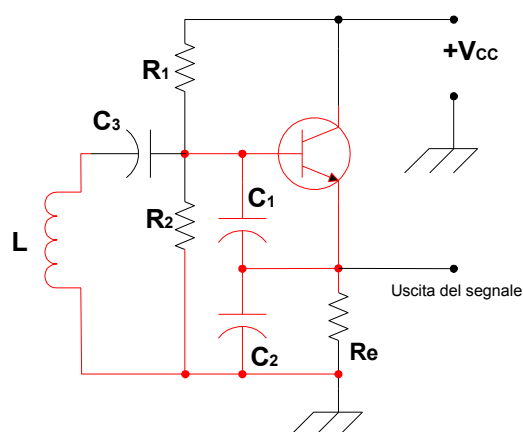


Figura 8 Circuito di un oscillatore Colpitts completo di polarizzazione e con BJT connesso nella configurazione collettore comune

Al circuito di figura 8 possiamo aggiungere senza modificare il suo funzionamento una ulteriore capacità ( $C_4$ , figura 9) in parallelo al circuito risonante composto da  $L$  e dalla serie di  $C_1$  e  $C_2$ .

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

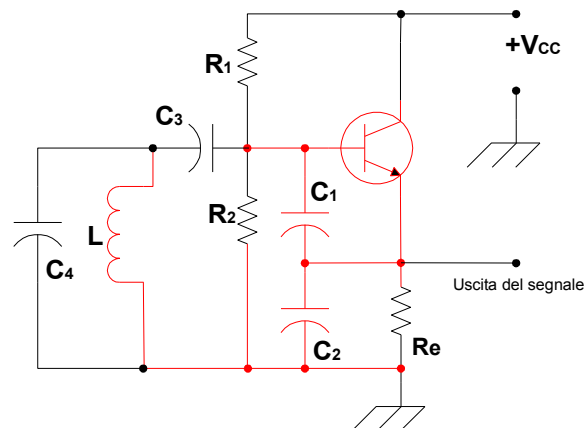


Figura 9

Se al condensatore  $C_4$  della figura 9 si sostituisce un diodo a capacità variabile completo del suo circuito di polarizzazione si ottiene un oscillatore al cui frequenza può essere variata entro una gamma di frequenza tramite una tensione continua di controllo. Questo circuito, figura 10, viene chiamato oscillatore controllato in tensione, VCO.

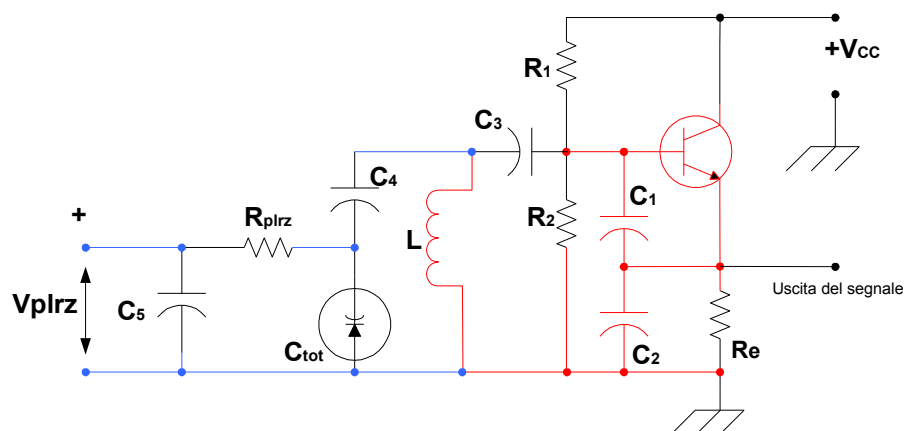


Figura 10 Oscillatore Colpitts controllato in tensione, VCO

Oltre ai componenti già descritti il circuito di figura 10 ha:

- $C_{tot}$ , diodo a capacità variabile, varicap,
- $C_4$ , condensatore serie,
- $R_{plrz}$ , resistenza di polarizzazione del varicap,
- $C_5$ , condensatore di fuga per le correnti alternate,

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Ridisegnando il circuito dinamico dell'oscillatore otterremo uno schema diverso da quello di partenza (figura 7) e sarà quello di figura 11.

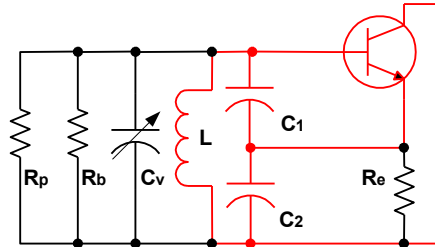


Figura 11 Circuito dinamico dell'oscillatore Colpitts di figura 10

I nuovi componenti del circuito dinamico sono:

- b)  $R_e$ , resistenza di polarizzazione di emettitore, che come abbiamo visto il suo effetto potrebbe essere neutralizzato da un RFC in serie,
- c)  $C_v$ , che è una capacità variabile, formata dalla serie di  $C_4$  e da  $C_{tot}$  (capacità del varicap), in funzione della tensione di polarizzazione  $V_{plz}$ ,
- d)  $R_b$ , resistenza equivalente al equivalente al partitore di base, è uguale al parallelo di  $R_1$  con  $R_2$ ,
- e)  $R_p$ , è la resistenza di polarizzazione del varicap riportata in parallelo al circuito risonante dal rapporto  $C_{tot}$  e  $C_4$  in serie.

### Riferimenti

- b) Weldon. L.A: **Voltage variable capacitor guide for communications circuit designers**. Philco 1964
- c) Rohde. U. L. : **Digital PLL frequency synthesizers**. Prentice Hall. 1983

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

---

### La stabilità di frequenza di un oscillatore

Uno degli attributi **più importanti** di un oscillatore è la sua capacità di conservare nel tempo il valore della frequenza di uscita .

Si definisce come stabilità di frequenza il grado con cui le variazioni di frequenza di un oscillatore deviano dal valore medio di frequenza (nominale) in un dato periodo di tempo.

Dal punto di vista matematico la **frequenza istantanea** è definita da:

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \text{ dove } \phi \text{ è la fase istantanea}$$

Il **valore medio della frequenza** in un dato periodo di tempo  $t_0$  è

$$f(t) = \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_1+t_0} f(t) dt$$

Solitamente la stabilità di frequenza di un oscillatore viene vista in due modi distinti.

Il primo modo è la stabilità a lungo termine, che tiene conto della variazione del valore medio della frequenza in un periodo di tempo considerevolmente lungo, minuti, ore, giorni, mesi, anni. Dipende

dalla qualità componenti che formano il circuito della rete di reazione e dell'oscillatore e dalla loro dipendenza dalle condizioni ambientali (temperatura, umidità,.....). Questi componenti modificano le loro caratteristiche nel tempo, in pratica invecchiano, anche a causa delle variazioni delle condizioni ambientali a cui sono sottoposti.

Il secondo è definito come stabilità a breve termine e si misura in intervalli di tempo di secondi o frazioni di secondo. Il tempo di osservazione deve essere sufficientemente breve (ma non superiore ad un certo tempo minimo) in modo che le variazioni di frequenza a lungo termine siano trascurabili. Anche questa dipende dai componenti e dalla loro dipendenza dalle condizioni al contorno (tensione di alimentazione, variazione del carico, repentine variazioni ambientali, vibrazioni, ..... ) ma soprattutto da come è stato progettato l'oscillatore stesso.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

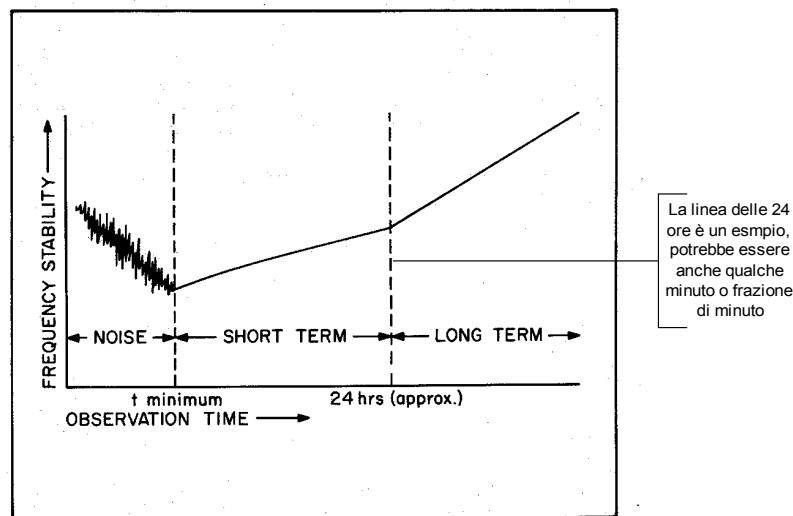


Figura 1

La figura 1 illustra in modo qualitativo la stabilità di frequenza in funzione del tempo di osservazione. (Riferimento 2)

La stabilità, soprattutto a breve termine, dipende dalle variazioni della fase nell'anello di reazione. Queste variazioni possono essere provocate da fattori esterni (temperatura, ...) che influenzano le caratteristiche dei componenti dell'oscillatore. La qualità di questi componenti deve quindi essere alta.

Se si considera l'oscillatore formato da un anello composto dall'amplificatore e da una rete selettiva in frequenza ( figura 2 ) e se l'anello è aperto, è possibile misurare la risposta nel dominio della frequenza del prodotto  $A\beta(j\omega)$ . Sarà cioè possibile tracciare due curve:

- b) una curva per il modulo  $|A\beta(j\omega)|$ , (figura 3),
- c) una curva per l'argomento,  $\arg A\beta(j\omega)$  (figura 3).

Se si considera il aperiodico il comportamento in frequenza dell'amplificatore il risultato della misura dipenderà, in gran parte, dalla rete selettiva in frequenza.



## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

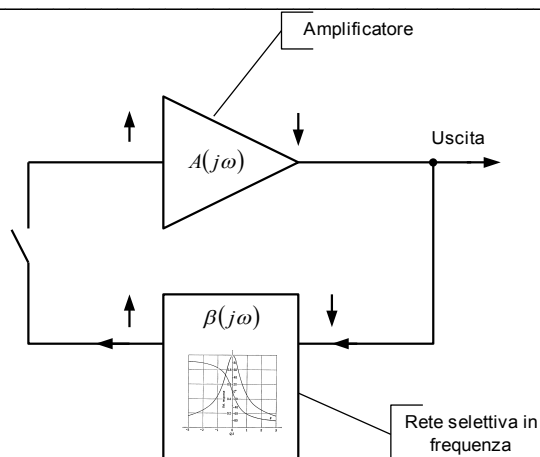


Figura 2

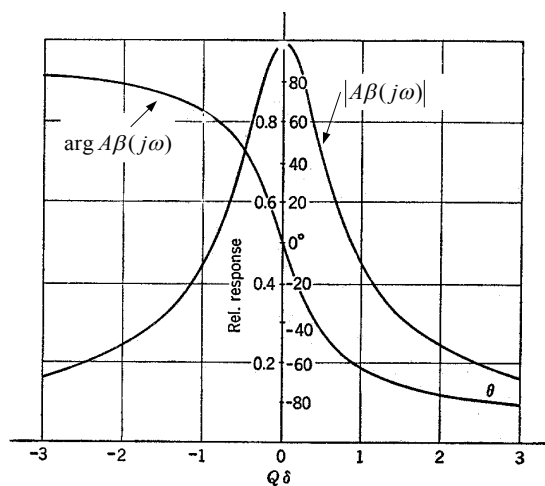


Figura 3

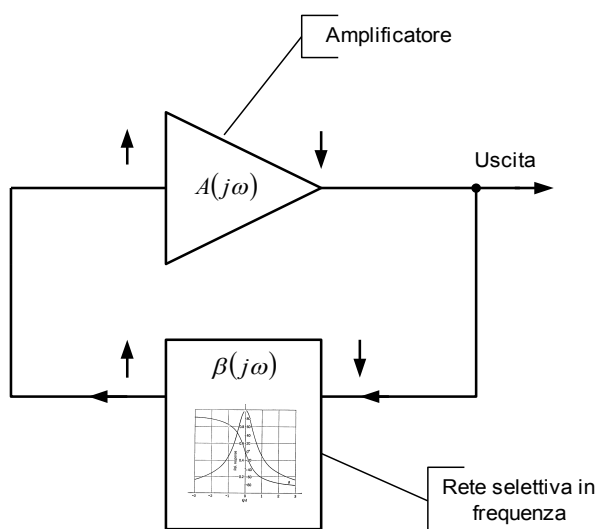


Figura 4

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

E' abbastanza intuitivo che, ad anello chiuso (figura 4), la frequenza di oscillazione coinciderà con quel valore di frequenza per il quale lo sfasamento complessivo è nullo.

La **stabilità** dipenderà dalla pendenza della curva fase-frequenza, cioè dipenderà dalla derivata dell'angolo di fase rispetto ad  $\omega$ ,  $\frac{d(\phi)}{d(\omega)}$ .

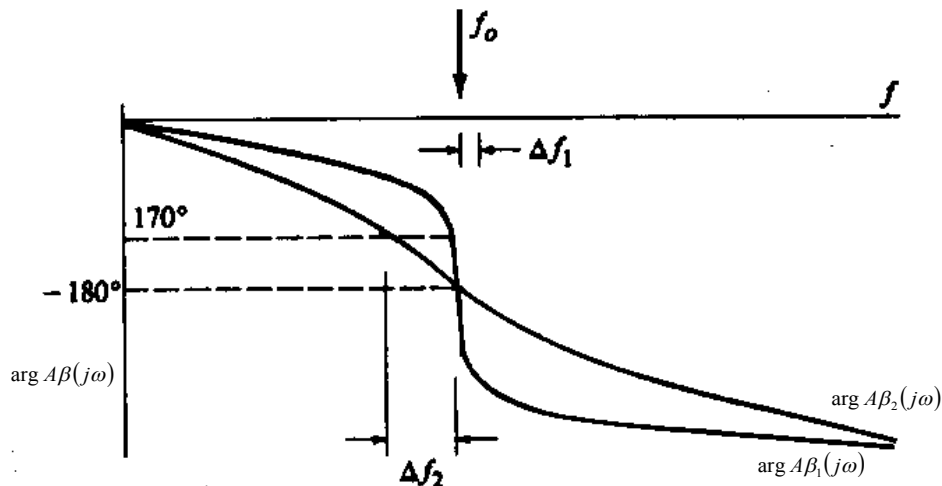


Figura 5

Vediamo un esempio. La figura 5 mostra due curve dell'andamento, ad anello aperto, di  $\arg A\beta(j\omega)$ , cioè dell'angolo di fase, di due differenti oscillatori ( 1 e 2).

Alla frequenza di oscillazione  $f_0$  la rotazione di fase è di  $-180^\circ$  (reazione negativa, ma l'amplificatore è invertente come in figura 4, per cui complessivamente si arriva a zero).

La figura 5 fa vedere come la variazione di frequenza,  $\Delta f_2$ , cioè la variazione associata alla rotazione di fase di  $10^\circ$  della rete N°2 (guadagno ad anello aperto  $A\beta_2(j\omega)$ ) sia maggiore della variazione di frequenza,  $\Delta f_1$ , associata alla rete N°1 (guadagno ad anello aperto  $A\beta_1(j\omega)$ ), la cui fase cambia più velocemente nell'intorno di  $f_0$  ( $\omega_0$ ).

Se una qualsiasi causa ( per esempio una repentina variazione di temperatura, un urto, una brusca variazione della tensione di alimentazione...) influisce sul sistema e provoca una variazione di fase, per esempio un ritardo di  $10^\circ$ , il sistema fa sì che il valore di frequenza cambi in modo da riportare la rotazione di fase complessiva di nuovo uguale a  $0^\circ$ .

Nell'esempio di figura 5 la frequenza dovrà inizialmente cambiare fino al punto corrispondente alla rotazione di fase dell'anello di  $-170^\circ$  per poi riportarsi al valore corrispondente a  $-180^\circ$ . Quindi nel caso dell'oscillatore con guadagno  $A\beta_1(j\omega)$  avremmo una variazione di frequenza  $\Delta f_1$ , mentre nel caso dell'oscillatore con guadagno  $A\beta_2(j\omega)$  avremmo una variazione di frequenza  $\Delta f_2$ ,  $\Delta f_2 > \Delta f_1$  cioè l' oscillatore N°1 sarà migliore dell'oscillatore N°2.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Gli elementi che compongono un oscillatore introducono una variazione della fase in funzione della frequenza ; il rapporto  $\frac{\Delta\phi}{\Delta\omega}$  è indice della dipendenza della frequenza dagli elementi circuitali che producono la variazione di fase. Queste considerazioni qualitative dicono che per ottenere un indicatore della stabilità di un oscillatore si potrà esprimere la fase,  $\phi$ , in funzione della frequenza e successivamente calcolarne la derivata. Si può definire il *fattore di sensibilità di stabilità di frequenza a breve termine* come

$$S_f = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \approx \omega_0 \left. \frac{d\phi}{d\omega} \right|_{f=f_0}$$

dove  $\Delta\phi$  è la rotazione di fase introdotta dall'anello di reazione  $A\beta(j\omega)$ , che provoca la variazione di frequenza  $\Delta\omega$  rispetto a  $\omega_0$ .

### Come si esprime la variazione di frequenza

La variazione di frequenza nei confronti del valore medio di frequenza di lavoro o nominale viene usualmente espressa in parti per milione, in breve **ppm**,

$$\Delta f = f_0 \pm \left( \frac{\Delta ppm}{10^6} \cdot f_0 \right).$$

$\Delta f$ , è la gamma di variazione di frequenza in un dato **periodo di tempo**,

Ad esempio un oscillatore con un valore nominale di frequenza pari a  $f_0 = 10 \text{ MHz}$  può avere una stabilità di frequenza di  $\pm 2 \text{ ppm}$ ,  $\Delta ppm = \pm 2 \text{ ppm}$ , nel campo di temperatura da  $-15^\circ\text{C}$  a  $+60^\circ\text{C}$ ; questo significa, che nel campo di temperatura specificato, la frequenza dell'oscillatore potrà variare di  $\pm 2 \text{ Hz}$  per ogni MHz,

$$\Delta f = f_0 \pm \left( \frac{\Delta ppm}{10^6} \cdot f_0 \right) = 10 \cdot 10^6 \pm \left( \frac{2}{10^6} \cdot 10 \cdot 10^6 \right) = 10 \cdot 10^6 \pm 20 = 10 \text{ MHz} \pm 20 \text{ Hz}$$

la variazione di frequenza sarà di  $\pm 20 \text{ Hz}$  in un dato periodo di tempo. Nello stesso modo si specifica la stabilità in funzione del tempo o di altri parametri, quali: tensione di alimentazione, la temperatura, l'umidità, la variazione della impedenza del carico, delle sollecitazioni meccaniche, eccetera). Ad esempio un oscillatore a cristallo di media qualità con una frequenza nominale di  $f_0 = 5 \text{ MHz}$  potrà avere una variazione di frequenza a lungo termine di  $\Delta ppm = \pm 1 \text{ ppm per anno}$ , che significa che dopo un anno la sua frequenza potrà essere cambiata di  $\pm 5 \text{ Hz}$ , dopo due anni di  $\pm 10 \text{ Hz}$ , dopo tre anni di  $\pm 15 \text{ Hz}$  e così via; un oscillatore di questo tipo avrà quindi bisogno di una taratura periodica per riportare il suo valore di frequenza all'interno del valore di partenza di  $\pm 5 \text{ Hz}$ .

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Alle volte si specifica la deriva di frequenza in %, ad esempio  $f_0 = 40 \text{ MHz} \pm 0,001\%$

$$\Delta f = f_0 \pm \left( \frac{\Delta \text{in}\%}{100} \cdot f_0 \right)$$

$$\Delta f = f_0 \pm \left( \frac{\Delta \text{in}\%}{100} \cdot f_0 \right) = 40 \cdot 10^6 \pm \left( \frac{0,001}{100} \cdot 40 \cdot 10^6 \right) = 40 \text{ MHz} \pm 400 \text{ Hz}$$

### La stabilità dell' oscillatore LC

Nell'ipotesi che la rete di reazione sia costituita da un circuito risonante parallelo andiamo a

ricavare  $\left. \frac{d\phi}{df} \right|_{f=f_0}$ .

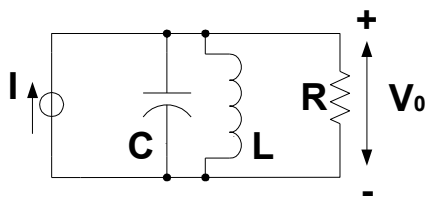


Figura 6 Circuito risonante parallelo

Nel circuito avremmo

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}}{\bar{V}_0} \quad \text{l'ammettenza è} \quad \bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + j \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

la rotazione di fase viene data da (*Nota 1*)

$$\arg = \frac{\bar{I}}{\bar{V}_0} = \phi = \arctan Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$$

che derivato rispetto alla pulsazione  $\omega$  sarà

$$\frac{d\phi}{d\omega} = \frac{\frac{1}{Q}}{\frac{1}{Q^2} + \left( \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega_0 \omega} \right)^2} * \frac{\omega_0^2 + \omega^2}{\omega_0 \omega^2}$$

che alla pulsazione di risonanza diventa

$$\left. \frac{d\phi}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{2Q}{\omega_0}$$

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

Riprendendo la definizione di fattore di sensibilità della stabilità di frequenza  $S_f$ ,

$$S_f = \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \text{ per } \omega_0 \text{ avremmo } S_f = \omega_0 \frac{\Delta\phi}{\Delta\omega} \approx \omega_0 \frac{d\phi}{d\omega} = 2Q$$

$$S_f = 2Q$$

Quindi per un oscillatore con rete di reazione formata da un circuito risonante, LC, (Hartley, Colpitts, ...) il fattore di sensibilità di stabilità di frequenza sarà tanto più grande quanto più grande sarà il Q del circuito, quindi quanto più basse saranno le perdite del circuito stesso (Nota 2)

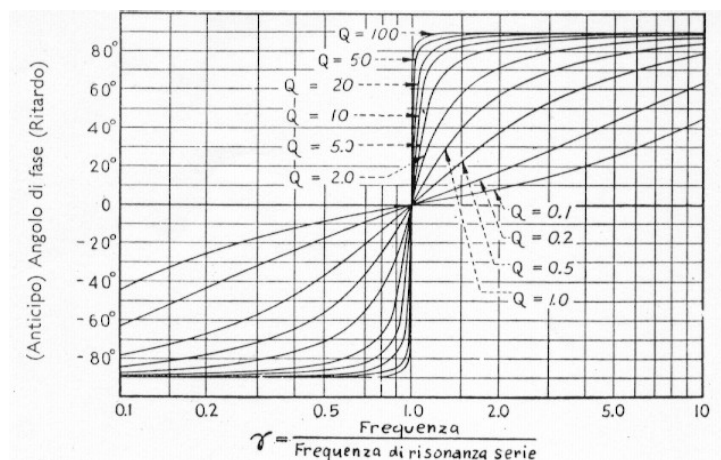


Figura 7

La figura 7 mostra l'andamento della curva di fase di un circuito serie LC con diversi valori del Q.

### Oscillatori RC

Per gli oscillatori RC a ponte di Wien si dimostra (Riferimento 1) che il fattore di sensibilità di stabilità di frequenza è

$$S_f = -\frac{2}{9} \delta$$

dove  $\delta$  è il fattore di sbilanciamento del ponte che è  $\delta = A_v$  per il circuito a ponte di

Wien  $\delta = A_v = 3$  quindi

$$S_f = -\frac{2}{3}$$

La conclusione è che gli oscillatori LC sono più stabili degli oscillatori RC.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

---

### Considerazioni sulla stabilità di frequenza

La *stabilità di frequenza a lungo termine* espresso in parti per milione,  $\Delta ppm = \pm x \text{ ppm}$ , di uno stesso oscillatore può esser specificata con valori diversi per differenti campi di temperatura, ad esempio:

- $\Delta ppm = \pm 0,5 \text{ ppm}$  nel campo di temperatura da  $+15^{\circ}\text{C}$  a  $+35^{\circ}\text{C}$ ,
- $\Delta ppm = \pm 2 \text{ ppm}$  nel campo di temperatura da  $-15^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$ ,

per la variazioni della tensione di alimentazione,

- $\Delta ppm = \pm 0,05 \text{ ppm}$  nel campo di tensione di alimentazione di  $5\text{V} \pm 5\%$ ,

per l'invecchiamento,

- $\Delta ppm = \pm 1 \text{ ppm}$  tipico per anno, solitamente l'invecchiamento comporta una variazione di frequenza in un verso solo.

Il fattore di *sensibilità di stabilità di frequenza a breve termine*,  $S_f$ , non compare nelle *caratteristiche di un oscillatore di commercio* o meglio non è un parametro che caratterizza un oscillatore una volta che questo è stato costruito, è invece è un fattore molto importante per il progettista dell'oscillatore.

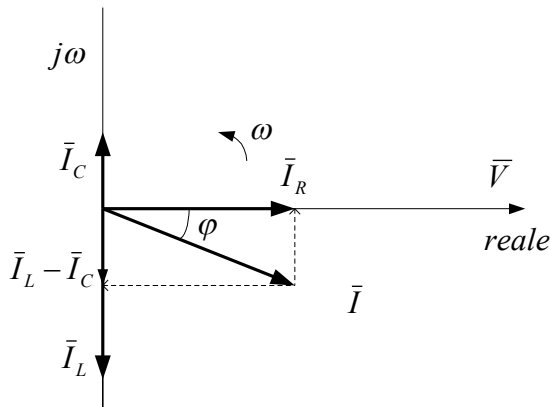
## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Nota 1

Nel circuito risonante parallelo avremmo

$$\bar{Y} = \frac{\bar{I}}{\bar{V}_0} \quad \text{l'ammettenza è} \quad \bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

la rotazione si ricava dall'angolo di sfasamento fra le correnti



$$\arg \frac{\bar{I}}{\bar{V}_0} = \arg \frac{\bar{I}_L - \bar{I}_C}{\bar{I}_R} \quad \tan \varphi = \frac{\bar{I}_L - \bar{I}_C}{\bar{I}_R} \quad \tan \varphi = \frac{\bar{V}_0 \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)}{\frac{\bar{V}_0}{R}} = R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

conviene esprimere l'angolo di rotazione di fase  $\varphi$  in funzione di  $\omega$  e  $\omega_0$ , tenendo conto che

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{da cui} \quad L = \frac{1}{C\omega_0^2} \quad \text{e} \quad C = \frac{1}{L\omega_0^2}$$

si ha

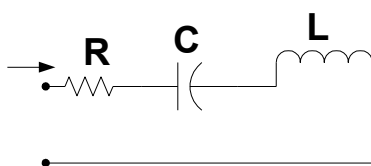
$$\tan \varphi = R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) = R \left( \frac{\omega}{\omega_0^2 L} - \frac{1}{\omega L} \frac{\omega_0}{\omega_0} \right) = R \frac{1}{\omega L} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_0} \right)$$

considerando che  $Q = \frac{R}{\omega_0 L}$  dove  $R = R_p$  si può scrivere che

$$\tan \varphi = Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_0} \right)$$

### Nota 2

Considerando un circuito serie composto da C, L ed R



## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

L'impedenza del circuito serie è data da

$$\bar{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

in condizioni di risonanza la pulsazione è

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \text{da cui} \quad L = \frac{1}{C\omega_0^2} \quad \text{e} \quad C = \frac{1}{L\omega_0^2}$$

$$\omega L \text{ si può riscrivere } \omega L = \omega \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\omega}{\omega_0} \frac{\sqrt{LC}}{C} = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\frac{1}{\omega C} \text{ si può riscrivere } \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega} \omega_0^2 L = \frac{\omega_0}{\omega} \omega_0 L = \frac{\omega_0}{\omega} \frac{L}{\sqrt{LC}} = \frac{\omega_0}{\omega} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

riscrivendo

$$\omega L = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{e} \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{\omega_0}{\omega} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

queste due equazioni esprimono la reattanza induttiva e capacitiva del circuito in funzione della pulsazione generica  $\omega$  per  $\omega_0$ ,  $L$  e  $C$  costanti.

Riscriviamo l'impedenza del circuito serie

$$\bar{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{\frac{L}{C}} - \frac{\omega_0}{\omega} \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \quad \text{da cui}$$

$$\bar{Z} = R + j\sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$$

### Riferimenti

J. Milman **Vacuum tube and Semiconductors electronics** (chapter18), Mc Graw-Hill 1958

Frequency Synthesizers **Application Note 96** (section III), Hewlett Packard

Jack Smith **Modern Communications Circuits** (chapter 7 & 10), Mc Graw-Hill 1986

M. Gasparini & D. Mirri **Dispositivi e circuiti elettronici VOL II**, Calderini



## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Gli oscillatori a cristallo

#### Generalità

I limiti maggiori degli oscillatori LC a tre punti sono legati alla difficoltà di ottenere la frequenza di oscillazione sufficientemente stabile per alcune applicazioni. Per questi oscillatori il coefficiente  $S_f$ , indice di stabilità di frequenza, risulta proporzionale al fattore di merito,  $Q$ , del circuito risonante che forma la rete di reazione, il cui valore varia da una decina a qualche centinaio. Devono essere anche prese in considerazione le variazioni delle condizioni ambientali (principalmente la temperatura) che influenzano  $L$  e  $C$  provocando una deriva della frequenza.

In alcune applicazioni si devono ottenere dei valori di stabilità di frequenza non raggiungibili con gli oscillatori LC, è necessario ricorrere all'uso di circuiti risonanti con un  $Q$  molto più alto di quello raggiungibili con gli elementi LC, questi risonatori sono di tipo elettromeccanico e sono principalmente costituiti da *cristalli piezoelettrici*.

#### Cristalli piezoelettrici

Alcuni materiali naturali ed anche sintetici, tra i quali il cristallo di quarzo ( $\text{SiO}_2$ ) hanno proprietà piezoelettriche e se sottoposti a deformazione meccanica generano tra le loro facce una differenza di potenziale. Viceversa l'applicazione tra le stesse facce di una differenza di potenziale termina una deformazione del cristallo. Se il dispositivo è montato in modo opportuno e se opportunamente eccitato il sistema meccanico che ne risulta entra in vibrazione. La frequenza di risonanza meccanica dipende dalle dimensioni del cristallo, dall'orientamento delle facce rispetto agli assi cristallini e dal montaggio meccanico.

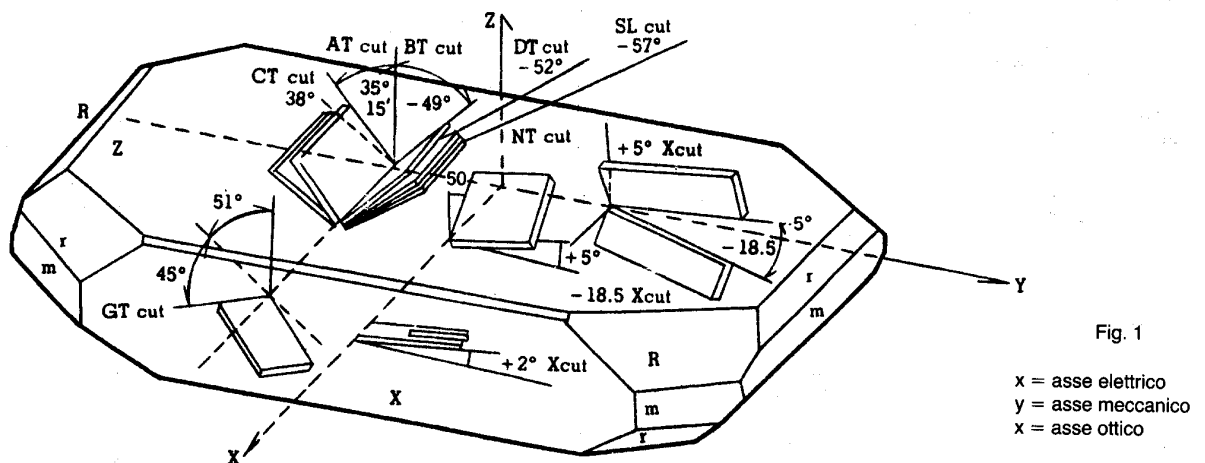
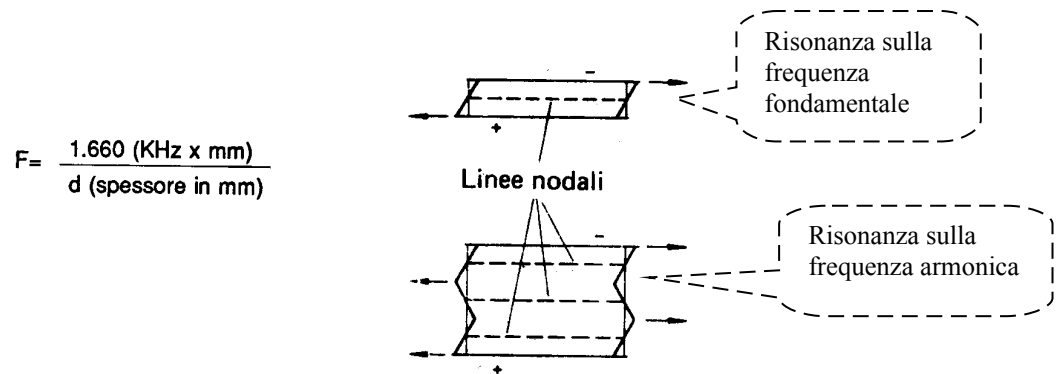


Figura 12

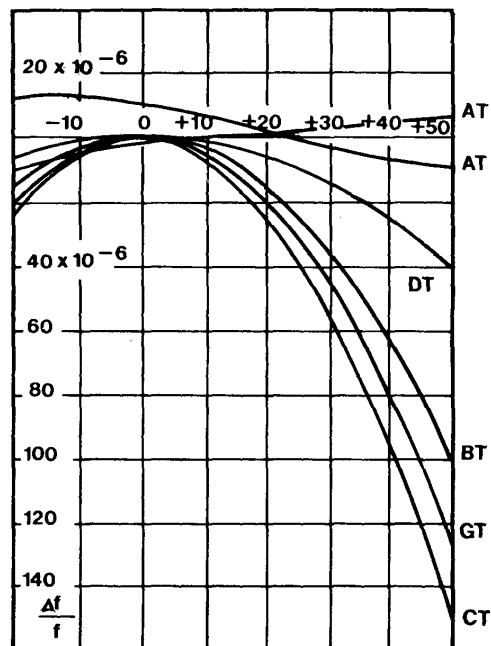
L'orientamento delle facce rispetto agli assi cristallini viene ottenuto *tagliando* opportunamente la piastrina che costituirà l'elemento risonante. Tra i vari *tagli* possibili (figura 12), quello AT è diventato il più classico nella produzione di quarzi per oscillatori. Nel taglio AT la deformazione meccanica avviene per scorrimento per spessore. La piastrina è generalmente un disco il cui spessore determina la frequenza di oscillazione. (figura 13)

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi



**Figura 13**

Due sottili elettrodi di metallo vengono depositati sotto vuoto sulle due facce del risonatore, per mezzo dei quali è possibile applicare un campo elettrico alternato che determina l'insorgere di una vibrazione meccanica.



**Figura 14** Caratteristica frequenza - temperatura per alcuni tipi di tagli

La caratteristica frequenza – temperatura della piastrina di quarzo è in prima approssimazione dipendente dal coefficiente di temperatura, dalla densità dalle dimensioni e dal modulo di elasticità del quarzo stesso e dipende dal tipo di taglio. Come si vede in figura 14 il taglio AT si distingue per una contenuta variazione della frequenza in funzione della temperatura, quando il campo di quest'ultima supera i +30° circa.

Per il taglio AT la curva varia secondo una funzione di terzo ordine che presenta un punto di flesso far i +25°C ed i +35 °C.

La figura 15 riporta in dettaglio le curve generalizzate frequenza temperatura per il taglio AT. La pendenza delle curve nell'intorno del punto di flesso dipende dall'angolo di taglio.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

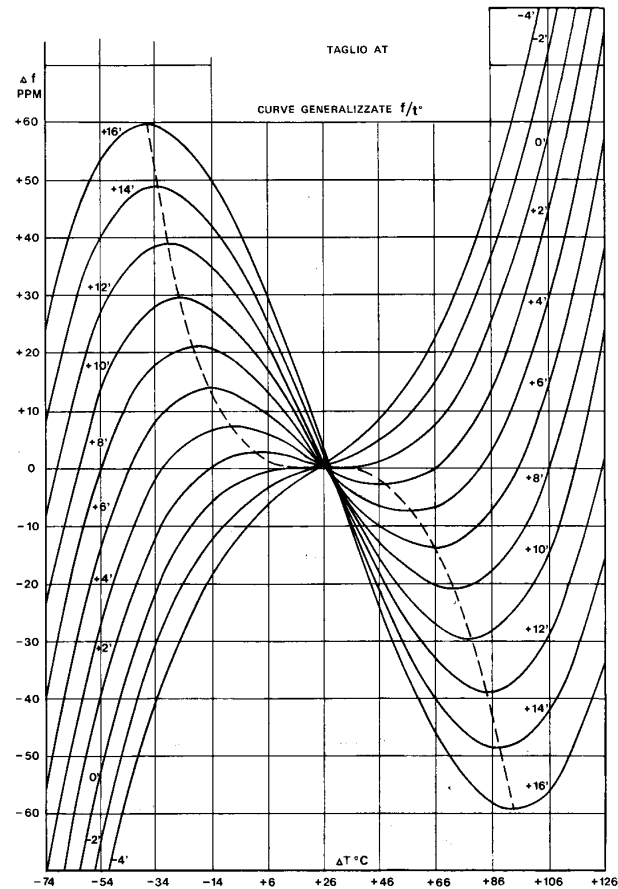


Figura 15 Curve frequenza - temperatura per il taglio AT

La tolleranza sugli angoli di taglio può variare da  $\pm 1'$  ( $' =$  secondo) a  $\pm 5'$  ovviamente più bassa è la tolleranza maggiore sarà la difficoltà nel costruire il cristallo e quindi anche il costo.

Il circuito equivalente di un cristallo è quello indicato in figura 16.

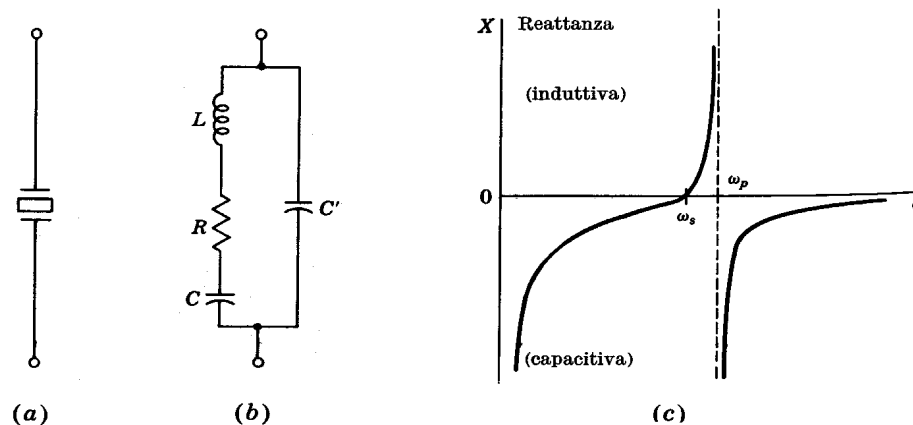


Figura 16 Circuito equivalente di un cristallo

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

In figura 16a è riportato il simbolo grafico di un cristallo di quarzo ed in figura 16b il suo circuito equivalente.  $C'$  tiene conto della capacità elettrostatica determinata dalle due facce metallizzate del cristallo e dalle capacità parassite dovute ai conduttori ed al contenitore. Il ramo RLC rappresenta invece il circuito elettrico equivalente alle caratteristiche di risonanza meccanica del quarzo :

- |    |  |
|----|--|
| d) | $L \equiv$ inerzia, legata alla massa  |
| e) | $C \equiv$ l'elasticità, (deformazione specifica)  |
| f) | $R \equiv$ la viscosità interna che genera le perdite<br>(coefficiente meccanico di smorzamento) |

Valori tipici di questi parametri sono:

$f$ (MHz)	Oscillazione	R(Ohm)	$C'$ (pF)	$C$ (fF)	$L$ (H)	$Q$
0,090	fondamentale	15 k	3,5	23		137
1	fondamentale	250	4	9		65.000
2	fondamentale	70	3,5	10		110.000
10	fondamentale	12	6	24		50.000
20	fondamentale	12	6	24		25.000
45	terza armonica	25	5	1,5		90.000
100	quinta armonica	40	5	0,3		130.000

I cristalli di tipo AT possono essere usati in fondamentale fino alla frequenza di 100 MHz mentre per frequenze superiori, sono usati in risonanza armonica.

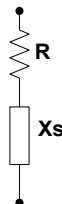


Figura 17 Circuito equivalente del cristallo

La figura 17 mostra il circuito equivalente del cristallo e la figura 5c mostra l'andamento della reattanza in funzione della pulsazione  $\omega$  ; andamento definito dalla:

$$jX_s = -\frac{j}{\omega C'} \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\omega^2 - \omega_p^2}$$

Si osservi che il diagramma di figura 5C è caratteristico di tutti i quarzi;  $X_s$  si annulla per due valori della pulsazione denominati rispettivamente *pulsazione di risonanza serie*,  $\omega_s$ , e *pulsazione di risonanza parallelo*,  $\omega_p$ .

La pulsazione di risonanza serie (ramo RLC) è data dalla  $\omega_s^2 = \frac{1}{LC}$

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

mentre la frequenza di risonanza parallelo (tiene conto anche di  $C'$ ) è data

$$\omega_p^2 = \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C'} \right)$$

essendo  $C' \gg C$  si avrà che  $\omega_s \approx \omega_p$ .

Tipicamente  $\omega_p$  è maggiore di  $\omega_s$  dell'uno per cento (1%), nell'intervallo di frequenza compreso fra  $\omega_s$  e  $\omega_p$  la reattanza  $X_s$  è induttiva; i cristalli di quarzo vengono fatti normalmente lavorare in questo intervallo.

I dati caratteristici principali di un cristallo di quarzo sono:

- d) *Frequenza nominale.*
- e) *Tolleranza di frequenza*, indica la massima deviazione dalla frequenza nominale, viene espressa in **ppm** (parti per milione).
- f) *Coefficiente di temperatura*, indica la variazione relativa di frequenza riferita ad una variazione di un grado positivo di temperatura. Viene espressa in **ppm/°C**. E' un parametro legato al taglio del quarzo.
- g) *Stabilità di frequenza nel tempo*, I quarzi con l'invecchiamento variano la loro frequenza. La deriva può essere di qualche **ppm** per anno.
- h) *Parametri cinetici*, il costruttore fornisce sempre la resistenza di perdita  $R$  e la capacità  $C$ .
- i) *Capacità parallelo*, viene precisato il valore della capacità parallelo  $C'$ .
- j) *Capacità di carico*, è la capacità che può essere connessa in serie o in parallelo al quarzo in relazione al circuito su cui deve essere inserito. Normalmente non supera i 30 pF. Viene usata per sintonizzare il quarzo in modo da recuperare la sua tolleranza di frequenza.
- k) *Livello di eccitazione*, è la potenza di che il quarzo può dissipare, non supera qualche mW e per certi quarzi può esser anche di frazioni di mW.
- l) *Contenitori*, ci sono moltissimi tipi di contenitori sia di tipo standard che no.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### I circuiti degli oscillatori a cristallo

I circuiti degli oscillatori a cristallo sono simili agli oscillatori LC.

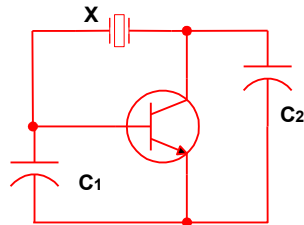


Figura 18 Circuito dinamico di un oscillatore a cristallo Colpitts

L'oscillatore Colpitts a cristallo può esser connesso nelle tipiche configurazioni di emettitore comune, base comune e collettore comune.

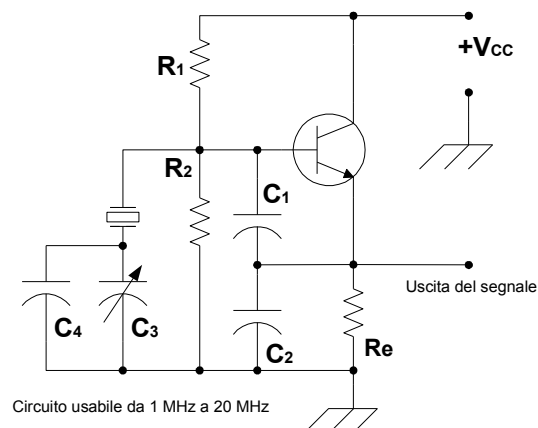


Figura 19 Oscillatore a cristallo con BJT connesso in collettore comune

Il circuito di figura 19 viene impiegato da qualche centinaio di kHz fino a circa 20 MHz, variando opportunamente i valori delle capacità in funzione delle indicazioni del costruttore del cristallo.

## Oscillatori parte seconda: polarizzazione, VCO, stabilità di frequenza, quarzi

### Frequenza fondamentale e frequenze armoniche

I quarzi piezoelettrici possono risuonare meccanicamente sia sulla frequenza fondamentale che sulle frequenze armoniche, cioè su frequenze multiple (dispari) della frequenza fondamentale. Per questa ragione il circuito equivalente del cristallo va scritto più completamente da come è stato fatto in figura 16b, la figura 20 mostra il circuito equivalente che tiene conto di queste considerazioni.

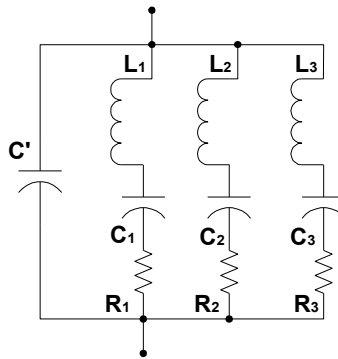


Figura 20

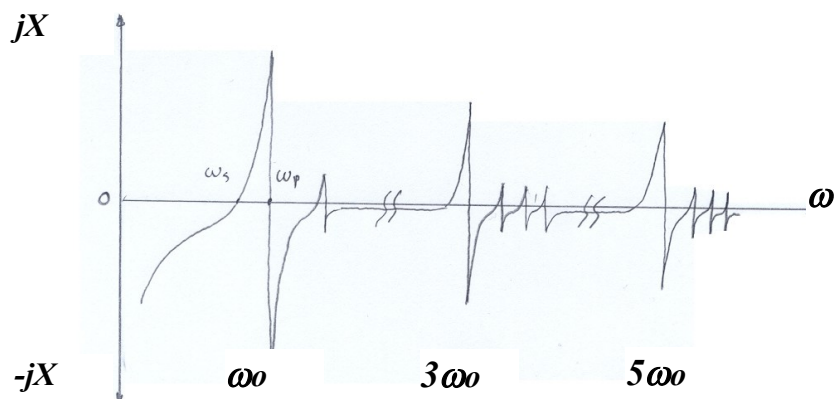


Figura 21

La figura 21 mostra l'andamento della reattanza in funzione della frequenza, nella figura si possono vedere tre distinte zone di risonanza, sulla frequenza fondamentale sulla terza armonica e sulla quinta armonica. Le zone di risonanza sono accompagnate da risonanze spurie.

**Riferimenti**  
Catalogo NDK