

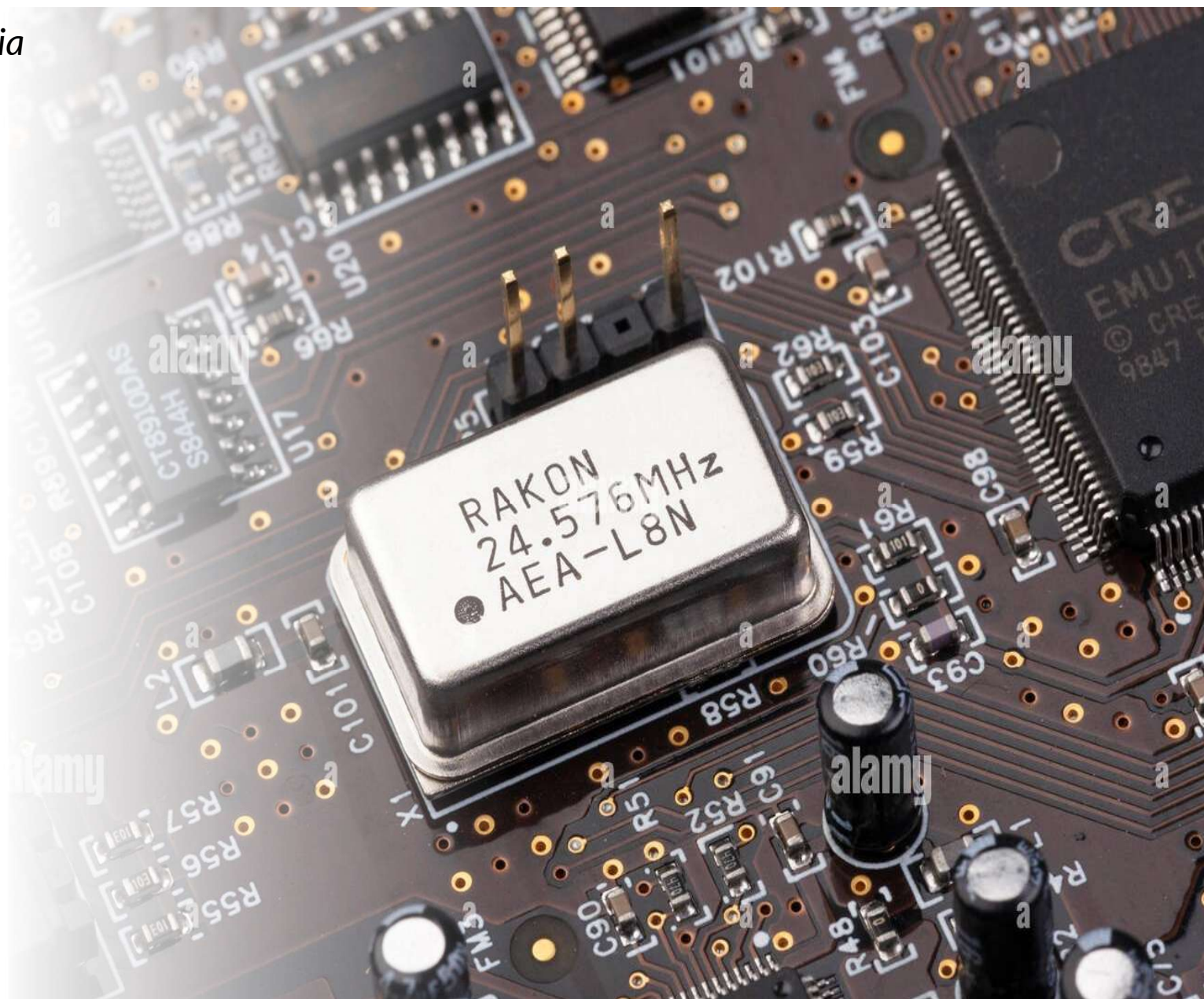
*Tesi di Laurea Triennale in Ingegneria
Elettronica*

Oscillatori al cristallo di quarzo e circuiti di compensazione della temperatura

Anno Accademico: 2024/2025
Studente: De Carlo Samuele
Relatore: Prof. Roncella Roberto



UNIVERSITÀ DI PISA



Caratteristiche del cristallo di quarzo

- Gli oscillatori al cristallo sfruttano la risonanza meccanica di un cristallo **piezoelettrico**

Una deformazione genera una DDP e viceversa

- Elevato **fattore di qualità Q**
- Capacità di generare una **frequenza** estremamente **precisa**
- Quali sono le applicazioni?



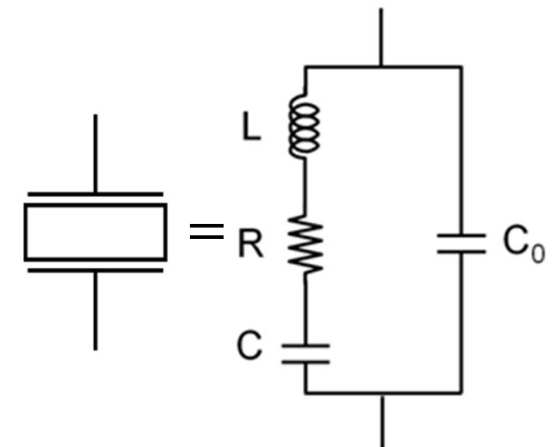
- 1) Circuiti di **temporizzazione**
- 2) Circuiti per **radiofrequenza**
- 3) Strumentazione di **misura**
- 4) Sistemi di **riferimento temporale**

Comportamento elettrico del cristallo di quarzo

- Il quarzo può accumulare energia sia sotto forma di **energia elettrostatica** sia sotto forma di **energia elastica**

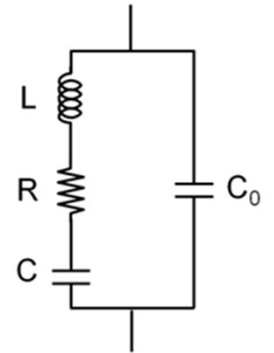
se lasciato evolvere liberamente, l'energia passa da una forma all'altra con un periodo di tempo caratteristico

- Il **circuito equivalente** elettrico del cristallo di quarzo è riportato nella figura a destra



- C_0 (capacità di shunt) rappresenta la capacità elettrostatica (di un CFPP)
- L'aspetto delle deformazioni viene tenuto conto dalla serie LC
- R rappresenta le perdite del circuito

Analisi in frequenza



- Trascurando R:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_0} // \left[j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right] = \frac{1}{j\omega C_0} // \left[\frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C} \right] = \frac{1 - \omega^2 LC}{j\omega C + j\omega C_0(1 - \omega^2 LC)} = \frac{1}{j\omega(C + C_0)} \frac{(1 - \omega^2 LC)}{(1 - \frac{\omega^2 LCC_0}{C + C_0})}$$

- L'impedenza Z ha un polo nell'origine, due zeri immaginari puri e due poli immaginari puri

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{LCC_0}{C + C_0}}} \quad C_0 \gg C \longrightarrow \omega_p \approx \omega_s \quad (\omega_p > \omega_s)$$

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \text{frequenza di } \textbf{risonanza serie} \quad (Z = 0)$$

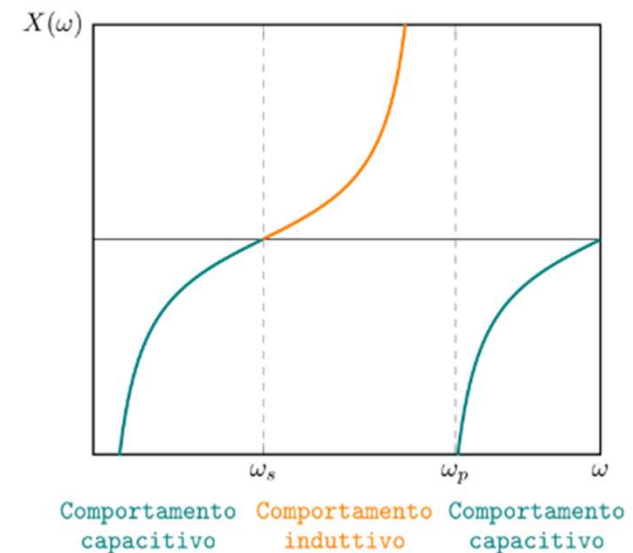
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{LCC_0}{C + C_0}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = \text{frequenza di } \textbf{risonanza parallela} \quad (Z = +\infty)$$

- Se viene fatto lavorare nella zona induttiva, riesce a compensare grandi variazioni di fase con piccole variazioni di frequenza



rete altamente **selettiva**

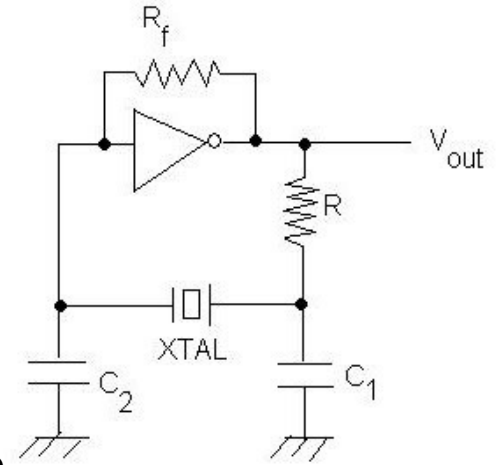
- Frequenza di oscillazione indipendente dal circuito



Oscillatore di Pierce

Condizioni di Barkhausen: $\begin{cases} \arg(A\beta) = 0 \\ |A\beta| \geq 1 \end{cases} \longrightarrow$ il sistema è instabile e oscilla

- L'inverter produce uno sfasamento di -180° , così come il resto della rete (sfasamento complessivo nullo)
- R_f serve a fissare il punto di lavoro dell'inverter CMOS (zona lineare)
- R limita la corrente (riduce il rischio di oscillazioni di overtone)
- Il circuito risuona alla frequenza $f_l = f_s \left[1 + \frac{C}{2(C_0 + C_l)} \right] \longrightarrow C_l$ capacità di carico
- Possibilità di modifica della frequenza di funzionamento inserendo una capacità in serie al cristallo (f_s più alta) oppure in parallelo ad esso (f_p più bassa)
- Come tutti gli oscillatori al cristallo, soffre le **variazioni di temperatura**, che possono influenzare la frequenza di oscillazione



\longrightarrow necessaria l'implementazione di circuiti di **compensazione termica**

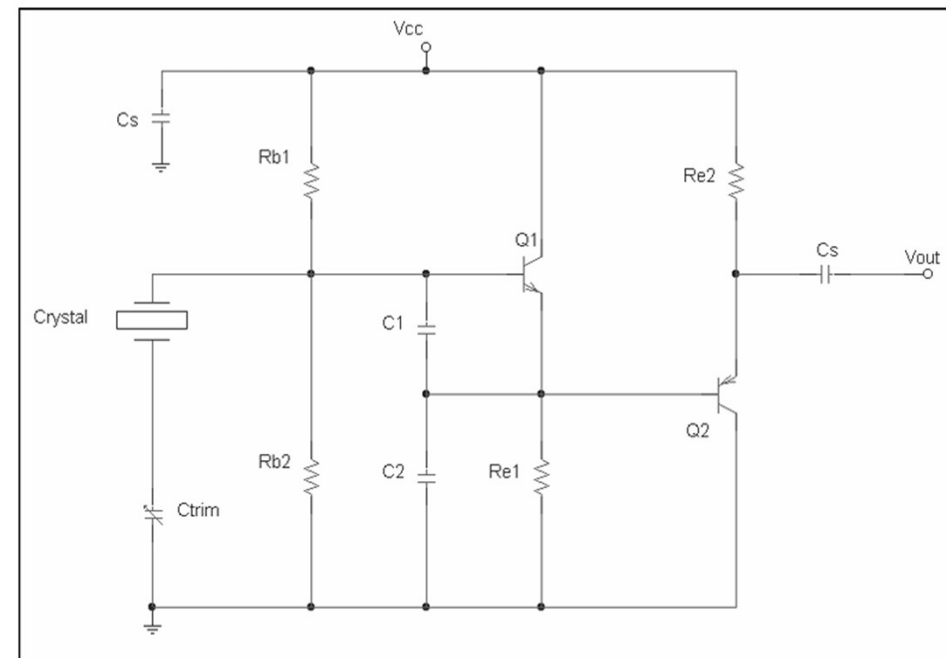
Oscillatore di Colpitts

Condizioni di Barkhausen: $\begin{cases} \arg(A\beta) = 0 \\ |A\beta| \geq 1 \end{cases} \longrightarrow$ il sistema è instabile e oscilla

- Collettore comune di uscita funge da **buffer** (R_{in} elevata e R_o piccola)

$$A = \frac{(h_{fe}+1)Z_L}{r_{be}+(h_{fe}+1)Z_L} (<1) \quad Z_L \cong \frac{X_2^2}{R} \quad \beta \cong \frac{X_1 + X_2}{X_2} \quad |A\beta| \geq 1 \longrightarrow (h_{fe} + 1)X_1X_2 \geq r_{be}R$$

- C_s condensatore di bypass
- C_s condensatore di uscita
- C_{trim} condensatore variabile



Stabilità della frequenza

- I cristalli hanno una caratteristica **temperatura-frequenza** di tipo cubico

$$\frac{\Delta f}{f_0} = A_1(T - T_0) + A_2(T - T_0)^2 + A_3(T - T_0)^3$$

- Due principali metodi di controllo delle variazioni di temperatura:

- 1) Termostatazione (**OCXO**, “oven-controlled crystal oscillator”)
- 2) Compensazione (**TCXO**, “temperature-compensated crystal oscillator”)

1) Più ingombrante, maggiore corrente assorbita, necessità di riscaldamento iniziale

2) Possono essere **attivi**, ovvero una rete di controllo effettua la compensazione generando una tensione variabile, oppure **passivi**, i quali utilizzano componenti passivi per aggiustare la frequenza di risonanza del circuito

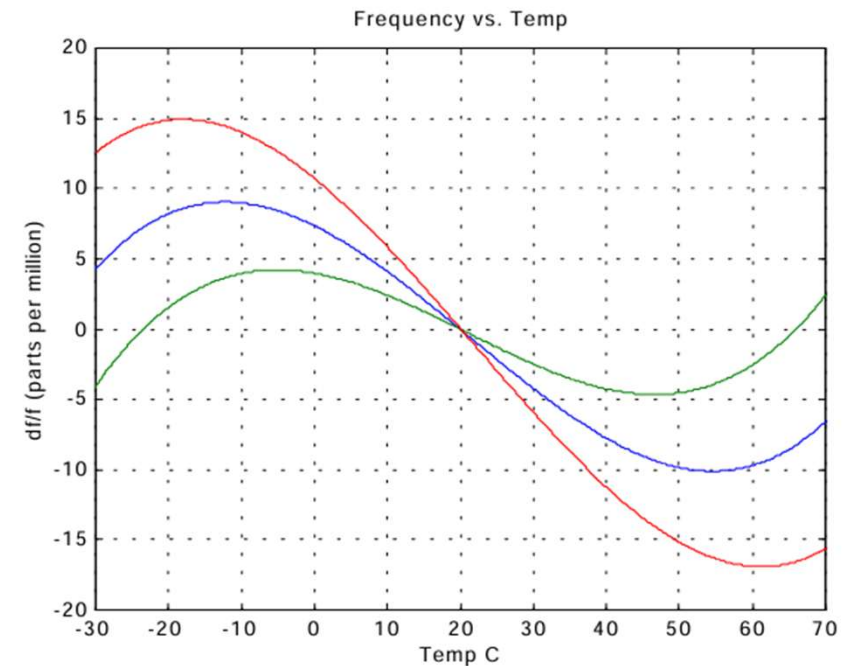


Figura 4

TCXO passivo(1)

- Se i **requisiti** per il controllo della frequenza non sono troppo stringenti (es: ± 3 ppm in un range da -20°C a $+70^{\circ}\text{C}$), un circuito di compensazione della temperatura può essere implementato utilizzando componenti analogici discreti
- In riferimento alla figura 4, per temperature comprese fra 0°C e 40°C e approssimando la curva come lineare, la compensazione può avvenire semplicemente utilizzando, per C_1 e C_2 , **condensatori NTC**, i quali variano la capacità linearmente con la temperatura

↳ es: un condensatore **100pF N750** ha un valore nominale di 100pF a 25°C e la sua capacità incrementa di 750-ppm per ogni grado Celsius in meno



In questo modo, un aumento della frequenza dovuto ad una diminuzione di temperatura, può essere **compensato** aumentando la capacità di carico C_l , facendo in modo che la variazione di frequenza sia uguale e opposta

- Questa strategia è applicabile solo nella zona lineare della curva; altrove, dove il comportamento è **non-lineare**, è richiesta una funzione non-lineare della capacità in funzione della temperatura per la compensazione



Termistore NTC

TCXO passivo(2)

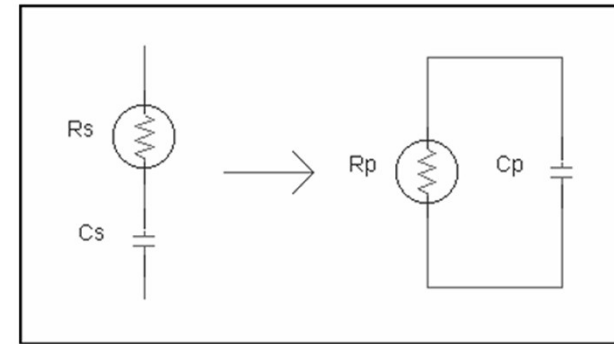
- I termistori hanno una dipendenza dalla temperatura di tipo **esponenziale**

$$R(T) = R_{nom} \cdot e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})} \quad \beta = \text{costante del termistore [K]}$$

- L'idea è quella di usare un termistore NTC (con un valore di resistenza piccolo a temp. ambiente) in serie ad un condensatore NP0...perché?

$$Z_s = R_s + jX_s \quad Z_p = \frac{R_p \cdot jX_p}{R_p + jX_p} = \frac{R_p X_p^2 + jR_p^2 X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad Q = Q_s = Q_p = \frac{|X_s|}{R_s} = \frac{R_p}{|X_p|}$$

$$R_s = \frac{1}{(1 + Q^2)} R_p \quad X_s = \frac{Q^2}{(1 + Q^2)} X_p \quad \longrightarrow \quad C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 R_s^2 C_s^2}$$



- Sotto i -20°C, se la temperatura decresce (i.e. la frequenza di risonanza tende a diminuire), la resistenza del termistore cresce esponenzialmente e la **capacità parallela effettiva** decresce proporzionalmente, diminuendo la C_l

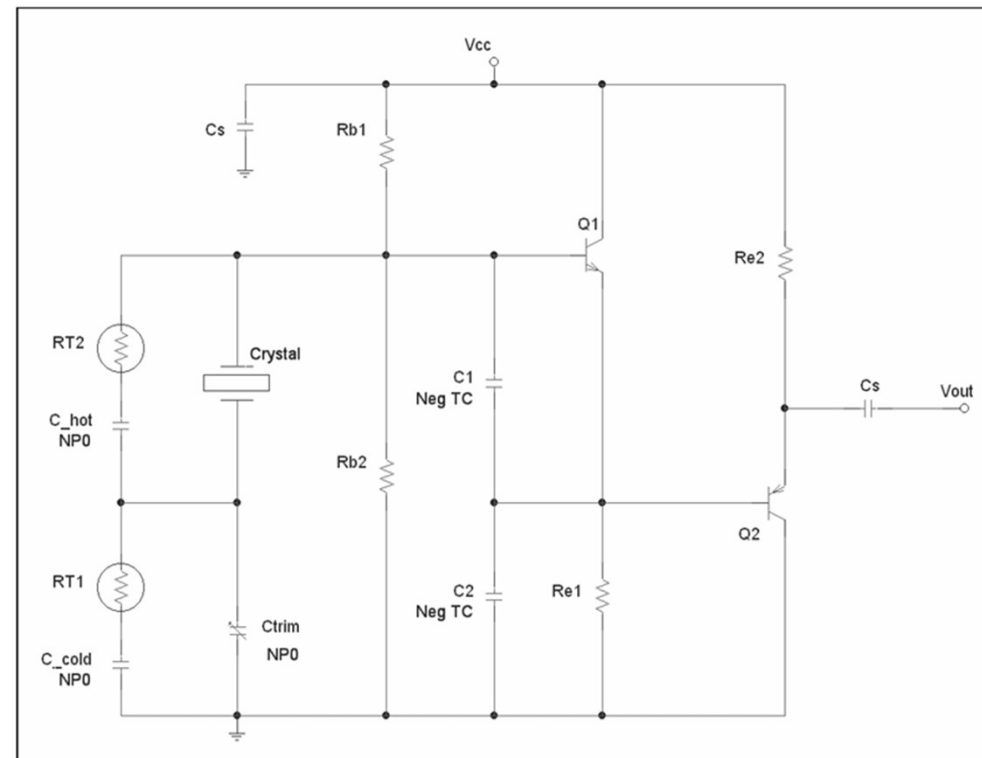


la stessa tecnica può essere utilizzata alle **alte temperature** dove la curva inizia a crescere, con un termistore che ha però un elevato valore di resistenza a temperatura ambiente

Colpitts: schematico completo

- La compensazione ad **alte temperature** avviene grazie a R_{T2} e C_{hot}
- La compensazione a **basse temperature** avviene grazie a R_{T1} e C_{cold}
- C_1 e C_2 sono condensatori NTC
- La **capacità di carico totale** risulta essere:

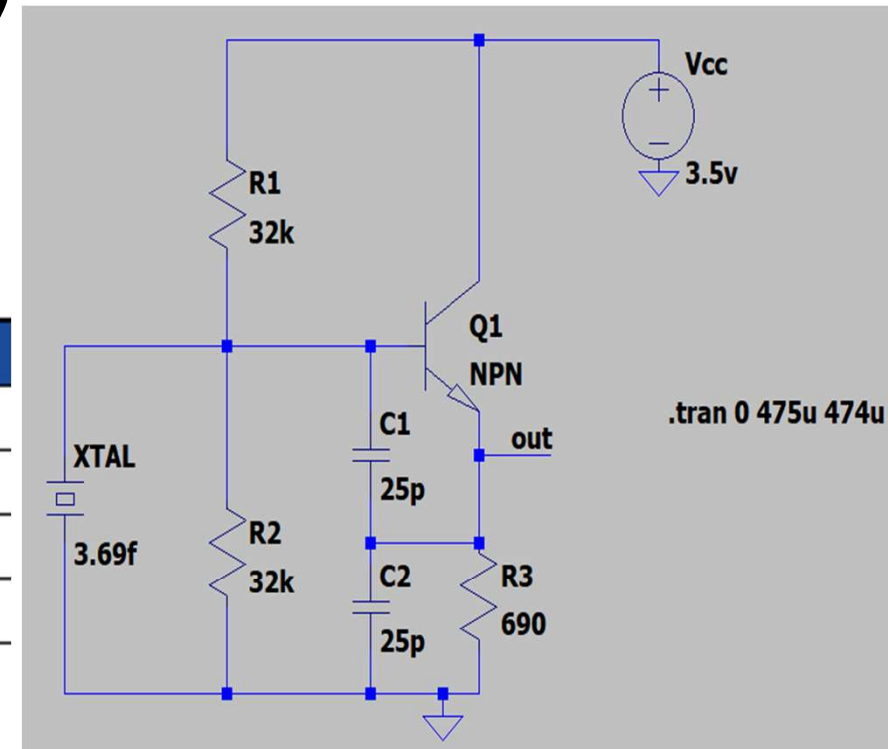
$$C_{tot} = \left[\frac{1}{C_{trim} + C_{cold_{equiv}}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right]^{-1} + C_{hot_{equiv}}$$



Simulazione(1)

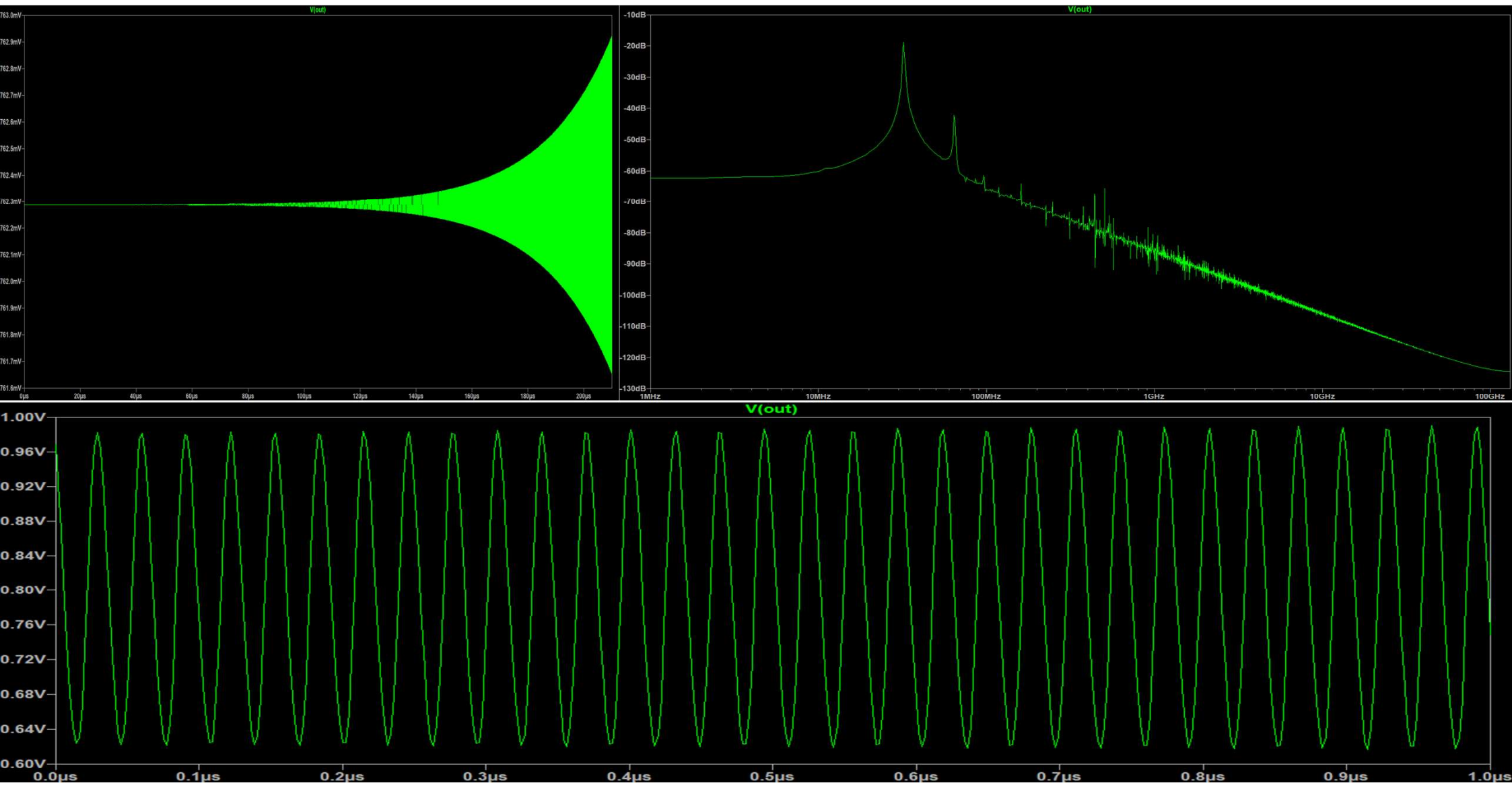
Abrakon Part #: AB38T-32.768KHZ
 Carrier Frequency: 32.768kHz
 Plating Load: 12.50pF

Symbol	Description	Average Value	Units
C0	Crystal Package Shunt Capacitance	1.82	pF
C1	Motional Capacitance (also referred to as Cm)	3.69	fF
L1	Motional Inductance (also referred to as Lm)	6,405,346.26	mH
R1	Effective Series Resistance (also referred to as ESR)	22,439.55	Ω
γ	C0/C1 ratio	493.22	



Capacitor Properties	
Capacitance[F]:	3.69fF
Voltage Rating[V]:	
RMS Current Rating[A]:	
Equiv. Series Resistance[Ω]:	22.439
Equiv. Series Inductance[H]:	6.405mH
Equiv. Parallel Resistance[Ω]:	
Equiv. Parallel Capacitance[F]:	1.82pF

Simulazione(2)

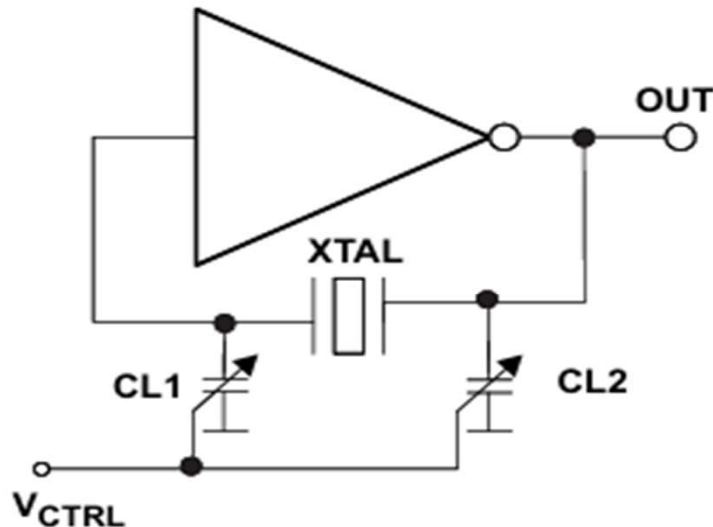


Conclusioni

- Esistono altre tecniche di **controllo** della frequenza di oscillazione:

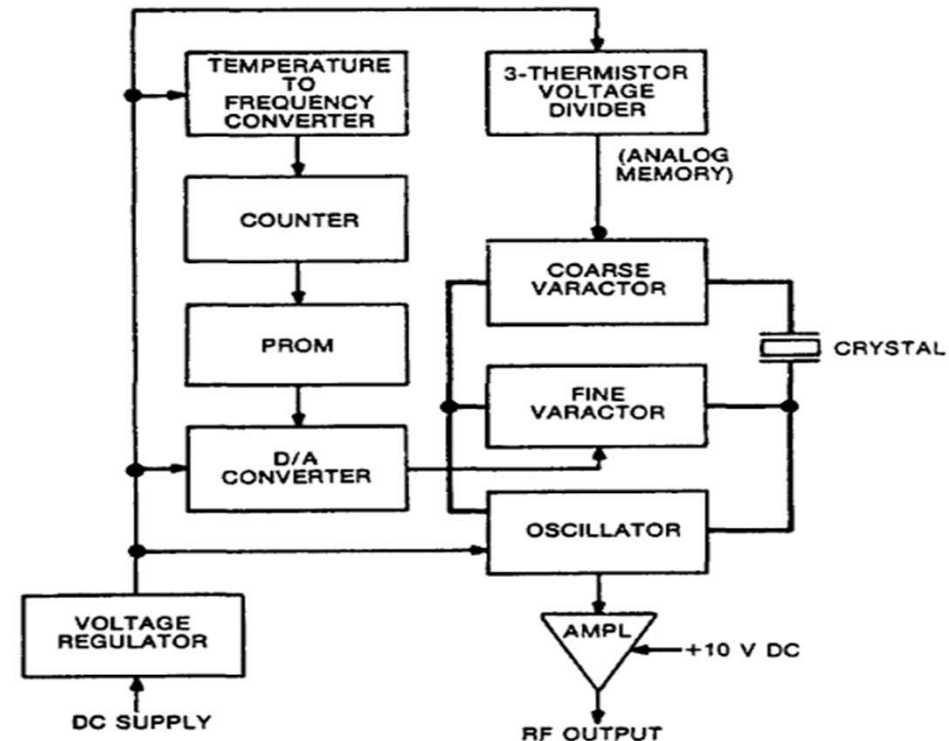
Oscillatori controllati in tensione(**VCXO**)

Es: rete di controllo e diodo **Varicap**



Rete digitale di controllo(**DCXO**)

Es: uso di memorie **EEPROM**



Grazie per l'attenzione!