

Was zu beachten ist

Auswahl des Quarzes für einen VCXO

Für die Auslegung eines VCXO muss ein „Pullable Crystal“ vorgegeben werden. In diesem Beitrag wird untersucht, wie ein Quarz im Einzelnen für eine VCXO-Anwendung zu spezifizieren ist.

Bei einem VCXO (Voltage Controlled Crystal Oscillator – spannungsgesteuerter Quarzoszillator) handelt es sich um einen Quarzoszillator, dessen Ausgangsfrequenz sich direkt proportional zu einer angelegten Eingangssteuerspannung verändert. Einer der häufigsten oder am weitesten verbreiteten Anwendungsfälle eines VCXO ist der Aufbau einer PLL zum Synchronisieren, Umsetzen (Switch-Funktion) bzw. „Ent-Jittern“ einer Eingangs-Referenzfrequenz (Bild 1).

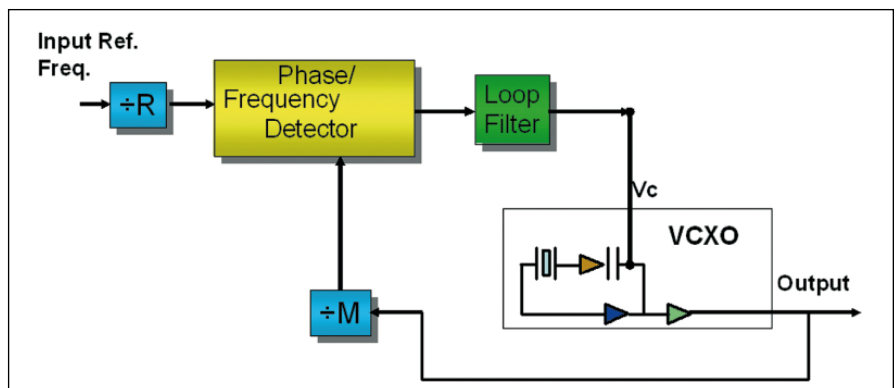


Bild 1: PLL Block-Diagramm mit VCXO.

(Alle Bilder: WDI)

Quarz-Parameter

Das elektrische Ersatzschaltbild des Quarzes ist in Bild 2 dargestellt. C1, L1 und R1 werden als Bewegungsparameter des Quarzes bezeichnet, und C0 als Shunt Capacitance. C0 ist real, d. h. der Wert kann tatsächlich mit einem einfachen Kapazitätsmesser gemessen werden. Die Bewegungsweigeparameter sind andererseits Äquivalente und somit nicht einfach zu messen. Der Betrag um den die Frequenz des Quarzes „gezogen“ wird, ist abhängig vom Verhältnis C0/C1.

Die Impedanzgleichung von Bild 2 lautet:

$$Z(j\omega) = \frac{(1/j\omega C_1 + j\omega L_1 + R_1)(1/j\omega C_0)}{(1/j\omega C_1 + j\omega L_1 + R_1) + (1/j\omega C_0)} \quad (0.1)$$

Die Gleichung ist komplex und hier ist nur der Imaginärteil interessant, der als Reaktanzkurve des Quarzes bezeichnet wird und aus Bild 3 ersichtlich ist.

In Bild 3 befindet sich der mit fs bezeichnete Punkt an der Stelle, an der die Motional Capacitance C1 schwingt und die „Equivalent Inductance“ L1 aufhebt. Ein

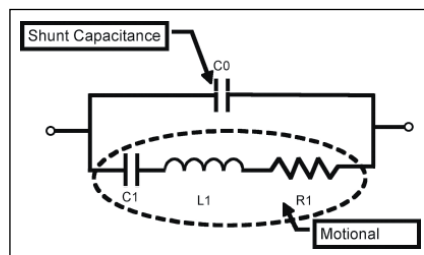


Bild 2: Quarz-Ersatzschaltbild.

auf die gewünschte Frequenz bei fs kalibrierter Quarz wird als „Reihenquarz“ bezeichnet. Ein Quarz, der auf die Funktion im „Parallelresonanzbereich“ kalibriert ist, wird als „Parallelquarz“ bezeichnet. Es ist zu beachten, dass hier kein Unterschied zwischen einem Reihen- und Parallelquarz vorliegt, außer wenn er vom Hersteller entsprechend kalibriert wird.

In einer VCXO-Schaltung wird eine Lastkapazität (CL) effektiv mit den Anschlüssen des Quarzes in Reihe geschaltet. In dem Maß, wie die Lastkapazität sich verändert, reagiert der Quarz durch Veränderung seiner Frequenz über den „Parallelresonanzbereich“. Diese Stelle ist heikel – und in vielen Abhandlungen falsch dargestellt. Die Lastkapazität wird mit dem Quarz in Reihe geschaltet, nie parallel. Mit anderen Worten: ein sog. „Parallelquarz“ bedeutet nicht, dass ein Kondensator mit dem Quarz parallel, sondern in Reihe geschaltet wird.

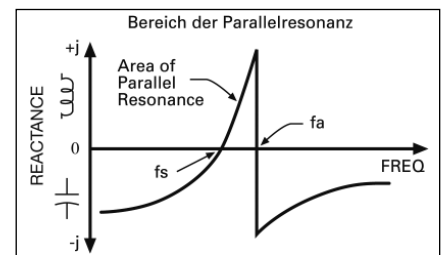


Bild 3: Quarz Reactance Kurve.

Die Lastkapazität ist die Kapazität, die erforderlich ist, um mit dem „Parallelquarz“ in Reihe geschaltet zu werden und die Frequenz in den Kalibrier-Toleranzbereich zu bringen.

Wie vorstehend erwähnt, verändert sich die Frequenz des Quarzes mit wechselnder Lastkapazität CL wie folgt:

$$\frac{\Delta f}{f_s} = \frac{C_1}{2(CL + C_0)} * 10^6 \text{ (ppm)} \quad (0.2)$$

Die Gleichung (0.2) gibt den Abstand in ppm vom Reihenresonanzpunkt fs bis zu einer bestimmten Lastkapazität CL an. Die grafische Darstellung der Gleichung (0.2) wird als Ziehkurve des Quarzes bezeichnet und erscheint in Bild 4. Aus der Gleichung (0.2) ist ersichtlich, dass der Abstand von fs bis zu einer bestimmten CL bzgl. der Frequenz (> Pulling) mit zunehmendem C1 zunimmt. Somit ist es vorteilhaft, große C1-Werte für einen VCXO zu verwenden.

AUTOREN

Gerd Reinhold,
Produktmarketing FCP
bei WDI AG

Ramon Cerda, Leiter
Entwicklung bei Crystek
Crystals Corporation

Gleichung (0.2) zeigt ebenfalls, dass CL und CO für maximales Ziehen des Kristalls möglichst klein vorgegeben werden müssen. Es zeigt sich, dass C1 abhängig ist von CO und dass C1 nicht erhöht werden kann, ohne dass CO zunimmt. Es braucht nach Wahl des Wertes von CL nur das Verhältnis CO/C1 als bestimmtes Maximum vorgegeben zu werden, um die Vorgabeanforderung für das Ziehen zu erfüllen.

Eine zweckmäßige Form der Gleichung (0.2) ist die „Pulling“-Gleichung von einer Lastkapazität zur nächsten:

$$\text{Pull}(CL1, CL2) = \frac{C1(CL2 - CL1)}{2(CO + CL1)(CO + CL2)} * 10^6 \text{ (ppm)} \quad (0.3)$$

Die Verwendung der Gleichung (0.3) wird im nachstehenden Design-Beispiel für VCXO veranschaulicht.

VCXO-Designbeispiel

Ein 19,44 MHz VCXO kommt in einer PLL-Anwendung zum Einsatz, um die Synchronisation mit einer Eingangs-Referenzfrequenz zu bewirken, die für mindestens 10 Jahre gesperrt bleiben muss. Die Umgebungstemperatur beim Betrieb liegt dabei zwischen -10°C und $+70^\circ\text{C}$. Es ist bekannt, dass die Eingangsreferenz eine Gesamtgenauigkeit von ± 20 ppm aufweist. Angenommen, die interne VCXO-Oszillatorschaltung wurde so konzipiert, dass sie eine Nennbelastungskapazität (CLN) von 14 pF darstellt, wenn die geregelte Spannung (Vc) in der Mitte liegt und bei hoher bzw. niedriger Steuerspannung 8 pF bzw. 27 pF vorliegen (CLL, CLH). Es sind alle erforderlichen Quarzparameter für den VCXO vorzugeben.

Lösung

Mittenfrequenz?

19,44 MHz

Belastungskapazität?

14 pF

Funktionsweise? (zum Beispiel „Grundwelle“ oder „3. Oberton“)

Ein Quarz weist mehrere Resonanzen auf (Bild 5). Die erste nennenswerte Resonanz wird als „Grundwelle“ bezeichnet. Die nächste größere Resonanz ist der 3. Oberton, danach der 5. usw. – nur ungerade Zahlen. Bitte beachten Sie, dass Quarze nicht über Oberwellen, sondern nur über Obertöne verfügen. Bild 2 kann durch Hinzufügen eines zusätzli-

chen Bewegungsweiges für jede Obertonresonanz erweitert werden. Die Motional Capacitance der Obertonzweige ist in diesem Fall gleich:

$$C_{Nth} = \frac{C1}{N^2} \quad (0.4)$$

wobei N die Nummer des Obertons und C1 die Motional Capacitance der Grundwelle darstellt.

So ist z. B. die Motional Capacitance des 3. Obertons gleich einem Neuntel der Motional Capacitance der Grundwelle. Daher erweist sich das Ziehen eines „Obertonquarzes“ als außerordentlich schwierig. Aus diesem Grund ist ein „ziehbarer“ Quarz ein Grundwellen-Quarz.

Widerstand? Da der Quarz ein passives Bauteil ist, weist er Verluste auf, die durch die Oszillatorschaltung ausgeglichen werden müssen. Der Entwickler der Oszillatorschaltung oder der Chiphersteller ist dafür verantwortlich, den maximalen Verlust vorzugeben, den der Quarz verkraften kann, um zuverlässige Funktion unter allen Bedingungen zu gewährleisten. Wenn eine Schaltung den Quarz bei f_s oder Reihe in Bild 3 betätigt, stellt der Wert von R1 den Verlust dar. Für dieses Beispiel wird jedoch ein „Parallel“- , nicht ein „Reihen“-Quarz vorgegeben, da bereits eine Belastungskapazität von 14 pF vorgegeben ist. Wenn also der Verlust nicht gleich R1 ist? Auf dem Gebiet der Parallelresonanz ist der Verlust abhängig von CL und CO und wird angegeben wie folgt:

$$E.S.R = R1(1 + CO / CL)^2 \quad (0.5)$$

wobei ESR „Equivalent Series Resistance“ bzw. Ersatzserienwiderstand bedeutet.

Für den ESR sind Werte bis max. 50 Ohm geeignet.

Kalibrierung oder Frequenz-Toleranz? Dies ist die Frequenzgenauigkeit des Quarzes bei $+25^\circ\text{C}$. Je enger diese Vorgabe ist, umso kostspieliger wird der Kristall. Da wir in unserer PLL-Anwendung eine Eingangsreferenz verfolgen und der Regelkreis stets geschlossen ist, ist die Kalibrierung nicht kritisch. Ein Wert von max. ± 25 ppm ist ausreichend.

Shunt Capacitance CO?

In modernen Quarzen beträgt der Wert stets max. 7 pF. Alternativ kann er vom Verhältnis CO/C1 abhängig sein. ►

Frequenzstabilität über den Temperaturgang?

Der Quarz verändert seine Frequenz mit wechselnder Temperatur, und ein angemessener Wert, der sich nicht kostensteigernd auswirkt, ist ± 30 ppm innerhalb von -10°C bis $+70^\circ\text{C}$.

Alterung?

Die Quarzfrequenz verändert sich im Laufe der Zeit. Eine gute Vorgabe lautet: ± 5 ppm im ersten Jahr, danach max. ± 2 ppm pro Jahr.

Motional Capacitance C1?

Zur Berechnung der Motional Capacitance muss zuerst festgestellt werden, wie viel „Pulling“ der Quarz zu leisten hat. Der erforderliche Mindestwert für „Pulling“ beträgt:

Erforderliches Mindest-„Pulling“ = (Eingangs-Referenzgenauigkeit + Gesamtfehler vom Quarz) wobei der Gesamtfehler vom Quarz = Kalibrierung + Frequenzstabilität + Alterung über 10 Jahre = $25 + 30 + (5+18)$ = ± 78 ppm
Deshalb:
Erforderliches Mindest-„Pulling“ = $20 + 78$ = ± 98 ppm

Mit der Gleichung (0.3) und der Einstellung $C0 = 7$ pF ist ein Wert für $C1$ zu berechnen, der ein Ziehen von min. -98 ppm von $CLN = 14$ pF bis $CLL = 8$ pF bewirkt. Derselbe Wert für $C1$ muss ein Ziehen von min. $+98$ ppm von $CLN = 14$ pF bis $CLH = 27$ pF bewirken. Mit $C1 = 11$ fF erhält man ein Zie-

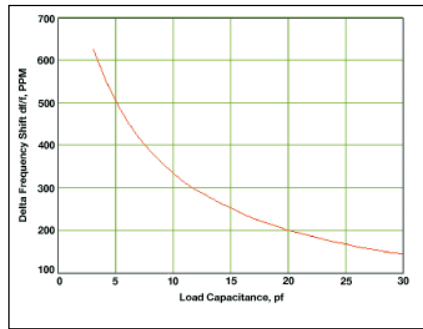


Bild 4: Quarz Zieh-Kurve bei $C1 = 10$ fF und $C0 = 5$ pF in Abhängigkeit vom CL.

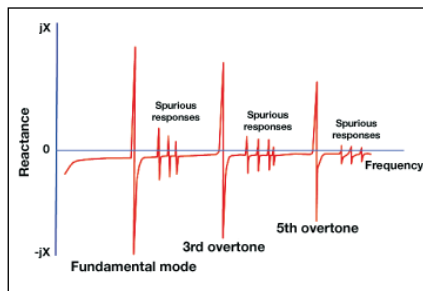


Bild 5: Quarz-Verhalten.

hen von $-104,8$ ppm zwischen 14 pF und 8 pF sowie $+100,1$ ppm zwischen 14 pF und 27 pF. Somit ist das minimal erforderliche Ziehen mit min. $C1 = 11$ fF und max. $C0 = 7$ pF erfüllt. Als Sicherheitsreserve sollte min. $C1 = 15$ fF vorgegeben werden.

Oszillatorleistung?

Die Oszillatorleistung gibt an, wie viel Effektivleistung der Quarz vertragen kann, ohne zu brechen oder übermäßig zu altern. Der Entwickler der Oszillatorschaltung oder der Chiphersteller sollte die Oszillatorleistung angeben, die der Quarz in der entsprechenden Schaltung verkraf-

ten soll. Je kleiner die Bauform, umso niedriger die vorgegebene Oszillatorleistung. Für die gewählte UM-1 Bauform ist eine Vorgabe von max. $500 \mu\text{W}$ für die Oszillatorleistung angemessen. Die Oszillatorleistung sollte in der Schaltung gemessen werden, um sicherzustellen, dass der Quarz nicht übersteuert wird.

Fazit

Aus den Überlegungen ergeben sich folgende Quarz-Spezifikationen (es gibt noch weitere Spezifikationen für Quarze, nachstehend sind jedoch die Spezifikationen aufgeführt, die für das Beispiel erforderlich sind):

- ▶ Frequenz: $19,44$ MHz
- ▶ Mode: Grundwelle
- ▶ Belastungskapazität: 14 pF
- ▶ Kalibrierung: ± 25 ppm
- ▶ Frequenz-Stabilität: ± 30 ppm
- ▶ Parallelkapazität: max. 7 pF
- ▶ Bewegungskapazität: min. 15 fF oder $C0/C1 (7 \text{ pF}/15 \text{ fF}) = \text{max. } 466 \text{ fF}$
- ▶ Alterung: ± 5 ppm im 1. Jahr, danach ± 2 ppm pro Jahr
- ▶ Oszillatorleistung: max. $500 \mu\text{W}$

Was den Schnittwinkel und die Bauform angeht sind folgende Punkte zu beachten. Die Schnittwinkel beeinträchtigen primär die Stabilität über den Temperaturgang. Ziehbare Kristalle sind aus Quarz mit AT-Schnitt hergestellt. Daher ist AT-Schnitt vorzugeben. Ziehbare Quarze werden aufgrund der höheren $C1$ -Werte in größeren Gehäusen untergebracht. In diesem Beispiel wählt man deshalb die bedrahtete Bauform UM-1. (sb)