

Leistungsfähige TCXOs

Fortschrittliche Temperaturkompensationstechniken

Nach einem kurzen Exkurs in die Entwicklung der TCXO-Temperaturkompensationstechniken seit den 1960er Jahren, erläutert dieser Beitrag den gegenwärtigen Stand der Technik. Durch Hochintegration digitaler und analoger Kompensationsschaltungen sind heute bei Präzisions-TCXOs Stabilitäten im Sub-ppm-Bereich möglich.

Autor: Gerd Reinhold, Steve Fry



Über 50 Jahre lang wurden zum überwiegenden Teil Thermistor-/Widerstandsnetze für die Temperaturkompensation von Quarzoszillatoren eingesetzt. Dabei beseitigt eine durch ein Netzwerk aus einem oder mehreren Thermistoren generierte Korrekturspannung die Frequenz/Temperatur-Abhängigkeit bei einem spannungsgeregelten Quarzoszillator. Mit dem Aufkommen von Kapazitätsdioden und aufgrund der bei NTC-Thermistoren erzielten Verbesserungen, wurde bei Quarzen eine wesentlich genauere Kompensation möglich, die Stabilitäten von 0,5 ppm ermöglichte.

Digitale Temperaturkompensation

Die bis Ende der 1970er Jahre erzielten Technologiefortschritte bei integrierten Schaltungen machten es schließlich möglich, Kompensationssysteme zu entwickeln, die Analog-Digital-Wandlung und Halbleiterspeicher einsetzten. Firmen wie Rockwell Collins und Greenray Industries stellten damit TCXOs her, deren Stabilität besser als 0,1 ppm war. Im Laufe der Jahre sind weitere digitale Implementierungen entwickelt worden, viele mit Rechenfunktion zur Vereinfachung der Kalibrierung und des Systembetriebs. Einige von ihnen verwendeten komplexe Temperaturmesssysteme, wie ein zweimodulares Verfahren zur automatischen Temperaturerfassung des Quarzes. Obwohl mit einigen dieser Entwürfe Temperaturstabilitäten von 0,05 ppm oder besser erreicht wurden, handelte es sich doch um relativ große und komplexe Baugruppen, bei denen es außerdem Rauschprobleme gab.

Analoge Integration

Die neuesten Entwicklungen für TCXO-Anwendungen sind aufgrund der weiter fortgeschrittenen Integration komplexe LSICs (Last Scale Integrated Circuits) mit einer Kombination aus Präzisions-Analogfunktionen, nicht-flüchtigem Speicher, Kapazitätsdioden und HF-Oszillatorschaltungen. Das Bild 2 zeigt das Blockschaltbild eines kompletten Präzisions-TCXO, der heute in einem Gehäuse von nur 3,2 mm x 5 mm untergebracht ist.

Polynomfunktionsgenerator

Das Herzstück des in Bild 2 gezeigten Blockschaltbildes ist der Generator zur Erzeugung von Polynomfunktionen (polynomial function generator). Das Ziel ist dabei, eine temperaturveränderliche Spannung zu erzeugen, die genau der VCXO-Spannung entspricht, und die erforderlich ist, um die Oszillatorfrequenz über den gesamten Temperaturbereich exakt auf dem Sollwert zu halten. Ausgehend von einem linearen Temperatursensor und unter Verwendung einer Reihe von Analogmultiplikationen werden die Koeffizienten eines Polynoms höherer Ordnung simuliert. Diese Funktion lässt sich wie folgt darstellen:

$$\Delta f/f(T) = a_0 + a_1(T-T_i) + a_2(T-T_i)^2 + a_3(T-T_i)^3 + a_4(T-T_i)^4 + a_5(T-T_i)^5$$

Dabei sind a_0 bis a_5 die Koeffizienten des zu erstellenden Polynoms, T ist die aktuelle Temperatur und T_i ist die "Umkehrtemperatur" des Quarzes (das heißt die Temperatur, um die die Quarzkurve in Bezug auf den unteren und oberen Umkehrpunkt zentriert ist, üblicherweise liegt sie bei etwa +26 °C).

Der Anpassungsbereich der Variablen wird so kalibriert, dass die verschiedenen Schnittwinkel des AT-Schnitt-Quarzes über den gesamten Temperaturbereich erfasst sind. Alle Temperaturen werden auf die Umkehrtemperatur des Quarzes bezogen. Die Werte der Koeffizienten werden als digitale Zahlenwerte in nicht-flüchtigen Registern auf dem Chip gespeichert. Ein idealer AT-Quarz sollte zwar einer Kurve dritter Ordnung folgen, aufgrund der Nichtlinearitäten im Schaltkreis und im Quarz ist es jedoch not-

wendig, auch Terme höherer Ordnung einzuschließen, um die benötigten Kompensationsspannungen zu generieren. Die Umkehrtemperatur des Quarzes spielt eine wichtige Rolle bei der Kurvenanpassung. Sie ist eine der Variablen, die programmierbar sein müssen, um eine größere Palette von Quarzen verwenden zu können. Manche rechteckigen Miniatur-Schnitt-Quarze können Umkehrtemperaturen von bis zu 40 °C aufweisen, was eine genaue Kompensationskurvenanpassung schwierig macht.

Integrierte Oszillatorfunktionen

Da die TCXO-Basisarchitektur auf einem einzigen IC untergebracht ist, werden bei einer fortschreitenden Verkleinerung der Präzisionsoszillatoren in Zukunft kleinere Resonatoren benötigt. Auf den neuesten Chips sind außer dem Funktionsgenerator auch alle anderen Oszillatorfunktionen enthalten. Sämtliche Schaltkreise auf dem Chip werden über einen Präzisions-LDO-Spannungsregler versorgt. Um die benötigte Frequenzstabilität zu erreichen, sind stabile Spannungen erforderlich, daher ist eine präzise Referenzspannungsquelle von entscheidender Bedeutung. Die niedrigste Betriebsspannung geht herunter bis +2,7 V. Die Treiberschaltung des Quarzoszillators befindet sich auch auf dem Chip. Dabei ist der Treiberstrom programmierbar, um unterschiedliche Quarzimpedanzen und -frequenzen bedienen zu können.

Die Ausgangsstufe arbeitet als Pufferstufe gegen Lasten auf Quarz und Oszillator und liefert die benötigten Ausgangsspannungen. Die meisten ASICs liefern entweder ein CMOS-Rechteck oder einen Clipped-Sine-Wave mit niedrigem Pegel ($1 V_{SS}$). Elektronische Frequenzregelung zur Implementierung einer VCXO-Funktion ist möglich. Zur Speicherung von Seriennummern und sonstiger Charakterisierungsdaten zur besseren Automatisierung ist es sinnvoll, einige Bytes dafür an Speicher zur Verfügung zu haben.

Kalibrierungs- und Kompensationsverfahren

Aufgrund der inhärenten Eigenschaften der Quarz-Oszillator-Kombination ist eine Messung und Kalibrierung jedes einzelnen Oszillators notwendig, wenn Werte unter 1 ppm angestrebt werden. Obwohl die meisten TCXOs in einer gegebenen Charge sehr ähnlich sind, werden bei einer Kurvenanpassung auf weniger als 1 ppm keine zwei Teile genau gleich sein. Daher ist es wichtig, jeden Oszillator über den gesamten einschlägigen Temperaturbereich aktiv zu charakterisieren, um dann die anfänglichen Koeffizienten-Parameter in das Bauteil zu laden.

Dazu wird in einem Durchlauf jeder einzelne Oszillator in dem einschlägigen Temperaturbereich betrieben; dabei wird die VCXO-Regelspannung ermittelt, die notwendig ist, um den Ausgang auf Nennfrequenz zu halten. Die so ermittelten Daten werden in

Auf einen Blick

Integrierte Oszillatorfunktionen

Da die TCXO-Basisarchitektur auf einem einzigen integrierten Schaltkreis untergebracht ist, was sie für zahlreiche Anwendungen geeignet macht, werden bei einer fortschreitenden Verkleinerung der Präzisionsoszillatoren in Zukunft kleinere Resonatoren benötigt. Auch wenn die Quarzresonatoren für die Massenfertigung in kleinen Abmessungen hergestellt werden können, kann aufgrund der physikalischen Begrenzungen eine bestimmte Größe nicht unterschritten werden.

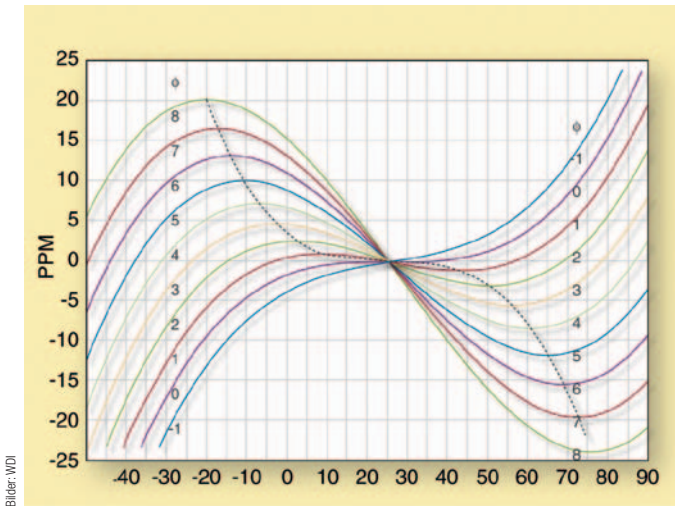


Bild 1: Frequenz/Temperaturcharakteristik bei der Grundfrequenz für verschiedene Schnittwinkel (AT-Schnitt).

einen Kurvenanpassungs-Algorithmus eingegeben, der die Polynomkoeffizienten berechnet, mit denen die beste Anpassung erzielt wird. Dann werden die Koeffizientenwerte in den ASIC geladen und ein weiterer Temperaturtest durchgeführt, um festzustellen, ob die Frequenzdrift innerhalb der Spezifikation liegt. Je nach Spezifikation können sich einige Exemplare bereits beim ersten Durchlauf als konform erweisen, bei den meisten Teilen dürfte jedoch eine Korrektur und ein weiterer Prüflauf erforderlich sein. Bei programmierbaren ASICs werden alle diese Funktionen ohne Eingriff des Bedieners von automatischen Prüfsystemen ausgeführt.

Frequenz-/Temperatur-Abhängigkeit

Das erreichbare Frequenz-/Temperatur-Verhalten hängt davon ab, wie genau die durch den Polynomgenerator erzeugte Kompensationsspannungskurve an die erforderliche VCXO-Spannung angepasst ist. Dies wird durch viele Variablen beeinflusst, darunter durch die Abstimmlinearität des VCXO, die Qualität des Quarzes (das heißt wie eng er der idealen AT-Kurve folgt), der Temperaturkoeffizient der anderen Oszillatorkomponenten, die „Umkehrtemperatur“ des Quarzes sowie die Stabilität der Spannungsreferenz. Das Bild 3 zeigt die erzielbare Frequenz-/Temperatur-Abhängigkeit.

Mikrosprünge

Eine weitere über den Temperaturbereich möglicherweise auftretende Unstimmigkeit ist ein sprunghafter oder stufiger Frequenzversatz. Solche Mikrosprünge sind nur gering und werden bei den normalen TCXO-Prüfungen oft nicht bemerkt. Um jedoch die größtmögliche Zuverlässigkeit zu gewährleisten, sollte deshalb die Frequenz jedes einzelnen Oszillators beim Hoch-/Herunterfahren der Temperatur von einem Extrem zum anderen und zurück kontinuierlich überwacht werden. Durch eine solche Prüfung ist gewährleistet, dass alle vorhandenen Störungen oder Mikrosprünge erkannt werden. Die Ergebnisse der Prüfung eines 20-MHz-TCXOs, der während einer 8 °C/min-Temperaturrampe gemessen wurde, zeigt Bild 4. Während der gesamten Zeit wird dabei die Ausgangsfrequenz kontinuierlich, ohne Totzeit zwischen den Ablesungen, 50-mal/s aufgezeichnet. Die blaue Linie stellt die Differenz zwischen den aufeinander folgenden Ablesungen dar, wodurch alle Momentansprünge hervorgehoben werden. Dieser rechteckige AT-Schnitt-Quarz zeigt während der Prüfung keinerlei

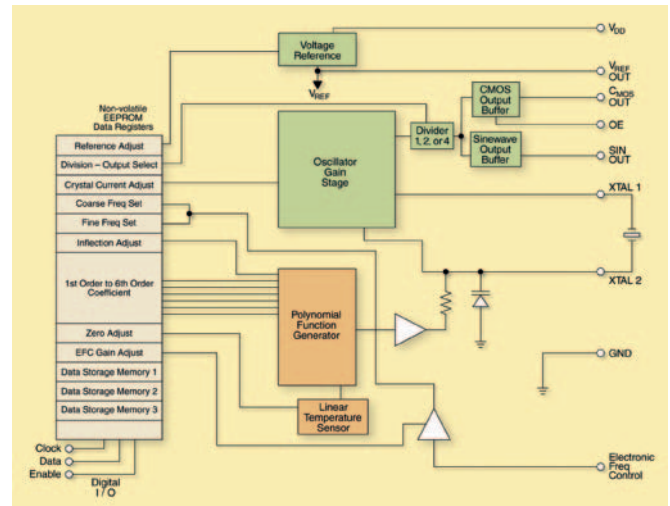


Bild 2: TCXO-ASIC mit Polynom-Funktionsgenerator, Oszillator-Verstärkungsstufe, Oszillator-Ausgangsstufen, Spannungsreferenz und NV-Speicher.

Störungen, lediglich ein paar kleinere Mikrosprünge, was auf einen TCXO mit hervorragender Leistungsfähigkeit hinweist.

Alterung

Ein weiterer problematischer Parameter für die meisten TCXO-Anwender ist die langfristige, durch Alterung verursachte Frequenzdrift. Zwar können auch die übrigen Bauteile des Oszillators zur Alterung beitragen, bei einem gut konzipierten Oszillator liegt die Alterung jedoch vorrangig am Quarz. Veränderungen in der Resonanzfrequenz des Quarzes treten aufgrund von Materialtransport zum oder vom Quarz auf. Eine Lockerung in der Quarzhalterung kann ebenfalls eine Rolle spielen. Durch die Fortschritte in der Konzeption und Verarbeitung von Quarzen konnte die Alterungsfähigkeit, auch für Miniaturgehäuse, auf unter 1 ppm pro Jahr reduziert werden. Langfristige Prognosen für die zu erwartenden zehn- oder zwanzigjährige Lebensdauer eines Oszillators können unter 5 ppm liegen, da die Alterungsrate mit der Zeit zurückgeht. Die Alterungseffekte lassen sich vorhersagen durch Extrapolierung der Kurven nach dem logarithmischen MIL-SPEC-Modell:

$$\Delta f/f(t) = a_0 + a_1 \ln(1+a_2 t)$$

Dabei ist t die Zeit in Tagen, a_0 , a_1 und a_2 sind für die Kurvenanpassung an die Beispieldaten angepasste numerische Koeffizienten.

Beschleunigungsempfindlichkeit

Bei Oszillatoren, die während des Betriebs Vibrations- und Stoßeinwirkungen ausgesetzt sind, kann die Beschleunigungs-Empfindlichkeit (g-Sensitivität, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$) des Quarzes ein wichtiger Parameter sein. Vibrationspegel modulieren das Ausgangssignal durch Rausch-Seitenbänder. Stoßimpulse erzeugen kurze Störungen der Frequenz, die bei Phasenregelschleifen oder ähnlichen Schaltungen problematisch sein können. Rechteckige AT-Schnitt-Quarze lassen sich so konzipieren, dass sie eine geringe Empfindlichkeit gegen diese Kräfte aufweisen. Für kritische Anwendungen sind Pegel von unter 5×10^{-10} (beziehungsweise 5×10^{-4} ppm) pro g auf der schlechtesten Achse routinemäßig vorgesehen. Aufgrund des Designs des rechteckigen Resonators und seiner Halterung ist vorhersagbar, welches die schlechteste Achse in Bezug auf die Beschleunigung ist. Der Vektor weist immer in die Vertikale oder z-Achse, die fast direkt lotrecht zu dem Quarzplättchen ist. In der x- und y-Achse ist die Empfindlichkeit extrem gering. Solche Quarze sind auch sehr widerstandsfähig gegen Pyroschock-Einwirkungen. Einige wurden auf Einwirkungen bis 100.000 g geprüft.

Zukünftige Entwicklungen

Da die TCXO-Basisarchitektur auf einem einzigen integrierten Schaltkreis untergebracht ist, was sie für zahlreiche Anwendungen geeignet macht, werden bei einer fortschreitenden Verkleinerung der Präzisionsoszillatoren in Zukunft kleinere Resonatoren benötigt. Auch wenn die Quarzresonatoren für die Massenfertigung in kleinen Abmessungen hergestellt werden können, kann aufgrund der physikalischen Begrenzungen eine bestimmte Größe nicht unterschritten werden. SMD-Gehäuse mit Abmessungen von 3,2 mm x 5 mm oder noch kleiner sind mit vernünftigen Dynamikparametern und Stabilitäten verfügbar. Wenn dieses Größenniveau jedoch noch erheblich unterschritten werden soll, so sind weitere Fortschritte in der Resonator-Technologie die Voraussetzung. Eine Lösung sind mikromechanisch hergestellte Siliziumresonatoren, die bereits auf demselben Chip wie die Oszillatorschaltung untergebracht werden. Obwohl solche Oszillatoren noch nicht die Stabilität von Präzisions-TCXOs aufweisen, geht die weitere Entwicklung genau in diese Richtung. In den einfacheren Massenanwendungen können Oszillatoren dieser Art schon bald die Quarzoszillatoren verdrängen. Überall dort, wo es jedoch um eine hochpräzise Frequenzregelung geht, werden Quarze auch weiterhin benötigt werden. (jj)



Die Autoren: Gerd Reinhold (Bild) ist im technischen Produktmarketing FCP bei WDI tätig; Steve Fry ist Entwicklungsleiter bei Greenray Industries, Inc. in Mechanicsburg/PA, USA.

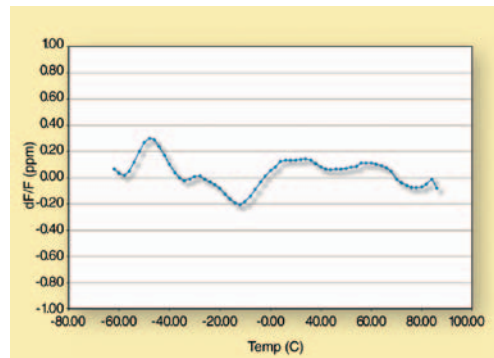


Bild 3: Frequenz/Temperatur-Abhängigkeit eines 20-MHz-TCXOs, gemessen in Intervallen von 2 °C.

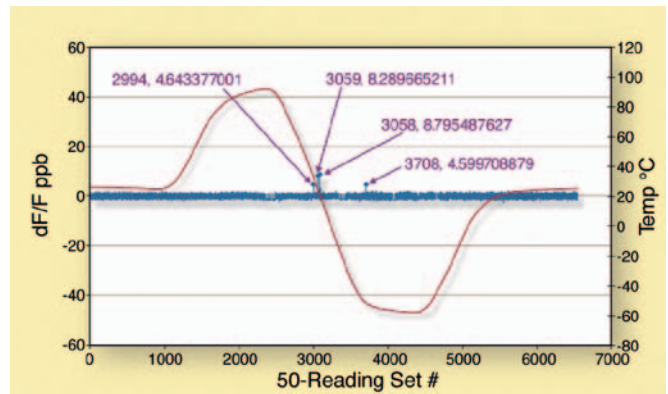
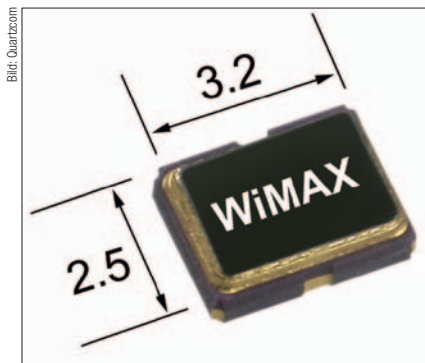


Bild 4: Ergebnisse der Prüfung eines 20-MHz-TCXOs, der während einer 8 °C/min-Temperaturrampe gemessen wurde.

Miniatur-SMD-Oszillatoren Für Datakom- und Telekom-Anwendungen

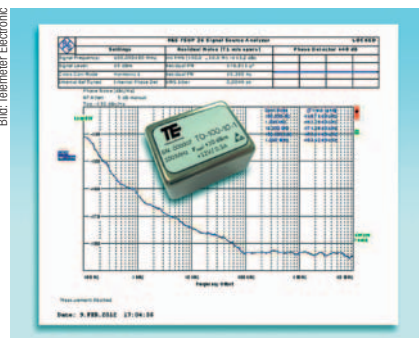


Quartzcom bietet mit dem TX7-302 und dem VT7-302 zwei Oszillatortypen in einer 2,5 x 3,2 mm² kleinen Miniatur-SMD-Bauform an. Als hochstabile, Low-Jitter-Lösungen sind diese Bauteile vor allem für anspruchsvolle Telekom- und Datakom-Anwendungen interessant. Typische Einsatzfelder sind alle Arten von Funkanwendungen und Mobilkommunikationen, proprietäre Netze, WLAN, Bluetooth, Femtocell, Pico-cell, WiMAX und GPS. Die Oszillatoren gibt es für die Versorgungs-

spannungen 2,5, 2,8, 3,0, 3,3 und 5 V und sie können entweder mit CMOS-Ausgang oder mit clipped-sine-wave-Ausgang geliefert werden. Die Frequenzstabilität beträgt ±0,5 ppm über einen Arbeitstemperaturbereich von -20 bis +70 °C beziehungsweise ±2,0 ppm über einen Arbeitstemperaturbereich von -40 bis +85 °C. Auf Anfrage können diese Frequenzstabilitäten noch erheblich enger gefasst werden. Der Oszillator hat einen Ziehbereich von ±5 bis ±10 ppm, wobei die Steuerspannung 1,50 V ±1,0 V beträgt. Bei einem Frequenzabstand vom Carrier von 10 kHz ist das Phasenrauschen besser als -145 dBc/Hz. Diese Oszillatoren decken 10,0 bis 40,0 MHz ab.

infoDIREKT 637ei0612

-162 dBc/Hz Phasenrauschen bei 1 kHz Trägerabstand Rauscharmer Quarzoszillator



Neu im Programm von Telemeter Electronic sind ITAR-freie Quarzoszillatoren. Das vorgestellte Modell trägt die Bezeichnung TO-100-10-1 und liefert ein Sinussignal mit einer Ausgangsleistung von mindestens +10 dBm an 50 Ω. Die Arbeitsfrequenz beträgt 100 MHz (andere Frequenzen sind auf Anfrage möglich) und ist elektrisch über ±5 ppm abstimmbare. Besondere Eigenschaft ist ein extrem niedriges Phasenrauschen nahe am Träger. Die garantierte Jitter-Spezifikation

des Oszillators beträgt 10 f_s. Bemerkenswert ist darüber hinaus eine große Unempfindlichkeit gegenüber Beschleunigungskräften, Schock und Vibration. Der Oszillator ist in einem einlötbaren 5-Pin-OCXO-Gehäuse mit den Abmessungen 36 mm x 27 mm x 17 mm untergebracht. Zusätzlich ist eine entsprechende SMD-Version derzeit in Arbeit. Der Quarzoszillator eignet sich unter anderem zum Mess- und Prüfmittelbau, für Referenzen für Synthesizer und Frequenzvervielfacher. Optional kann der Oszillator mit einem eingebauten GPS-Empfänger ausgerüstet werden. Durch dieses optionale Feature verbessert sich die Langzeit-Stabilität des Oszillators.

infoDIREKT 638ei0612