

## De Beste Xtal Oscillator

door PAOSU

### Inleiding

Onze voorvaders hadden hem al bedacht: de Clapp-oscillator. Hiermee kun je de meest stabiele oscillator maken. Met stabiel bedoel ik niet alleen 'dat hij weinig verloopt' maar ook 'dat hij weinig zijbandruis verlost'. Het eerste heet in vaktermen *de lange-duur-stabiliteit* het tweede, hoe kan het anders, *de korte-duur-stabiliteit*.

Hoe zit dat met een Xtal-oscillator? Niet veel anders dan met een LC-oscillator. Een Xtal heeft een veel grotere Q dan een LC-kring, en je kunt hem nauwelijks verstemen.

Een Xtal-oscillator is veel stabiel, zowel 'op de lange duur' als 'de korte duur', maar dat wisten we allemaal al. Voor sommige mensen is de lange-duur-stabiliteit van een Xtal-oscillator nog niet goed genoeg. Zij koppelen hem aan deze of gene standaard-zender, of zelfs aan een satelliet. Ik ga het hier *niet* over hebben. Ik beperk mij tot de **korte-duur-stabiliteit**.

De korte-duur-stabiliteit, de faseruis dus, wordt daarentegen steeds belangrijker. Bij een Xtal-oscillator is die sowieso minstens 30 dB beter dan van een LC-oscillator. Voor directe toepassing in een kortegolf-radio is dat altijd meer dan voldoende, echter voor de Giga-Hertz-ers onder ons, die de opgewekte frequentie (eindeloos) gaan vermenigvuldigen, wordt dat anders: elke verdubbeling van frequentie resulteert in 6 dB meer fase-ruis.

Er is nog een heel andere hoek waar de fase-ruis erg belangrijk blijkt te zijn: bij AD- en DA-conversie in hoog-gekwificeerde digitale audio-systemen. Daar reken ik een 'ordinaire' CD-speler ook onder. De zgn. 'clock oscillator' in die systemen moet zeer weinig jitter vertonen. Hier ga ik er niet verder op in omdat dit geen HiFi-blad is. Het laatste wat ik er over zeg is dat de audio-kwaliteit zeer afhankelijk is van de reinheid van de 'clock', vooral dicht bij de draaggolf. Ik houd mij bij TentLabs al weer jaren met dit onderwerp bezig....

Voor alle duidelijkheid: ik beperk me hier tot de korte-duur-stabiliteit, de jitter of fase-ruis van Xtal-oscillatoren. De jitter in het tijd-domein (meestal gebruikt in de digitale wereld) wordt uitgedrukt in: "ps", pico seconde of zelfs "fs", femto seconde. Bij 'jitter' wordt alleen gekeken naar de grootte van de fout bij de nuldoorgangen van het (digitale) signaal: hoeveel ps of fs de flank naast de gewenste plek valt. Met welke *frequentie* de flanken 'heen en weer springen' kun je in het tijd-domein niet bepalen.

In de radio-wereld werken we liever in het frequentie-domein en hebben we het over 'faseruis' (phase noise), en daarvan weten we dat die dicht bij de draaggolf 'erger' is dan verder weg. De faseruis wordt uitgedrukt in het aantal dB's dat die onder de draaggolf ligt bij 1 Hz bandbreedte op x Hz afstand: bijv. "-120 dBc/Hz op 1 kHz afstand", vaak geschreven als: "-120 dBc/Hz @ 1 kHz". Laten we de laatste schrijfwijze maar aanhouden.

Bij (kortegolf) radio meten we meestal op 1 of 10 kHz afstand van de draaggolf. Dat is dicht genoeg bij om de kwaliteit van een radio in dit opzicht te beoordelen. Bovendien is het niet zo eenvoudig om, zonder speciale dure apparatuur, dicht bij de draaggolf te meten, zeker niet als het om zulke goede oscillatoren als een Xtal-oscillator gaat. Hoe je dat

thuis toch voor elkaar kunt krijgen, vertel ik misschien een andere keer.

Als je in de literatuur kijkt, vind je steevast de Driscoll-schakeling waarin het Xtal in serie-resonantie werkt. Die zou de minste zijbandruis vertonen. De SC-sneede van het Xtal zou dan beter zijn dan de AT-sneede. Bovendien zou een Xtal in derde overtoone ook minder ruisen. Dat spul moet natuurlijk in klasse-A werken!

Ik houd het bij de Clapp-oscillator (op Internet vaak verward met de Collpitts) met een AT-Xtal in grondtoon ('fundamental mode'). Die staat, met mijn extra AVC in klasse-C. De electronica doet er dan minder toe. De ruis wordt in hoofdzaak door de kwaliteit van het Xtal bepaald. Ik heb daar betere resultaten mee dan 'vriendjes' die met de Driscoll aan de gang zijn. Bovendien verkies ik JFET's boven BJT's. Die veroorzaken de minste 1/f-ruis. MOSFET's zijn in ieder geval uit den boze.

### De Clapp-oscillator

In [De Beste Oscillator] en [De Beste Oscillator Beter Begrepen]<sup>1</sup> leg ik voor een LC-oscillator uit waarom en hoe ik de Clapp-schakeling gebruik. Beide bovenstaande artikelen zijn ook op mijn web site te vinden.

Bijgaande is de schakeling getekend voor een Xtal van ongeveer 11 MHz. 'Dat is toch een Colpitts-oscillator', hoor ik al roepen. Nee dus! Het vervangingsschema van het Xtal ziet er uit als een (grote) L met een (kleine) C *in serie* die de frequentie bepalen, (ik ga even voorbij aan de houdercapaciteit). In serie met het Xtal kan nog een C gezet worden van zo'n 30 pF om de frequentie iets omhoog te brengen als dat moet.

C' en C" zijn hier 100 pF. Het blijkt dat:

$C' = C'' :: 1000/fo \dots (pF)$ . Dit werkt zeker voor frequenties van 4 - 30 MHz. Het komt niet op een enkele pF aan. Ik zal straks uitleggen hoe ik aan die getallen kom.

De koppel-condensator moet steeds 10 - 15 pF zijn, zagen we eerder. De lekweerstand is hier 220 kΩ. Die mag niet kleiner dan 100 kΩ worden.

Om de J310 heel te houden als de oscillator (nog) niet oscilleert, moet er in de source een kleine weerstand Rx zitten, zodat er nooit meer dan 20 mA<sup>2</sup> kan lopen als de schakeling niet oscilleert. Tijdens oscilleren loopt er niet veel meer dan zo'n 600 μA, afhankelijk van de kwaliteit van het Xtal....

### De kwaliteit van het Xtal

De kwaliteit Q van een Xtal of een LC-kring wordt meestal bepaald door de kwaliteit van de spoel:

$Q = \omega L/R$ , waarin  $\omega = 2\pi f$  en R = de ohmse weerstand van de spoel.

De capaciteit in een kring is in de regel van een veel betere kwaliteit dan de zelfinductie, dus hoeven we daar geen rekening mee te houden. Of dat ook geldt voor de mechanische zelfinductie  $L_m$  en de mechanische capaciteit  $C_m$  in een Xtal, weet ik niet. De verhouding  $L_m/C_m$  is echter zo ontzettend groot (bij 11 MHz bv.:  $L_m = 13,7 \text{ mH}$  en  $C_m = 14,5 \text{ fF}$ ) dat ook hier die formule voor de Q zou kunnen gelden. Als ik echter de vele metingen van Pieter Meijer (Catena) bekijk,

<sup>1</sup> zie literatuurverwijzing

<sup>2</sup> bij de SMD-versie, de 'through hole'-exemplaren kunnen best 25 mA trekken.



blijkt dat we voorzichtig moeten zijn met conclusies. Er is niet zo'n direct verband tussen de Q's die hij meet en de  $L_m$ , de  $C_m$  en de  $R_m$ . Bovendien heb ik weinig zijbandruis gemeten bij speciaal gepolijste Xtallen van [QT], die een twee keer zo grote  $R_m$  hebben als hun niet-gepolijste broertjes van Philips.....

### Oscilleer-voorwaarde

[Davidse]<sup>3</sup> zegt dat de rondgaande versterking in een nog niet oscillerende schakeling ongeveer 2 moet zijn om te voorkomen dat de stroom uit de transistor te sterk vervormt tijdens oscilleren. De harmonischen in de stroom vouwen terug (door onderlinge menging) naar de grondfrequentie en dragen bij aan de zijbandruis. Bij een 'begin-versterking' van 2 zou die bijdrage niet te groot zijn.

Dit gezegd hebbende zullen we eens kijken hoeveel die rondgaande versterking in ons geval is. De steilheid S van een J310 = >10 mA/V in geaarde source-schakeling. In onze oscillator ligt de drain (voor HF) aan aarde, maar dat geeft hetzelfde resultaat.

Als de verhouding  $C'/C'' = 1$  is, hebben we van source naar gate al een versterking van 2 te pakken tijdens oscilleren. We hoeven nu alleen nog te kijken hoeveel de J310 versterkt met  $C''$  tussen drain en source. Die moet minstens 1 zijn om Davidse tegemoed te komen, afgezien van  $C_k$  en de ingangs-capaciteit van de FET.

Hoe groot mag  $C''$  (tussen drain en source) dan zijn om een versterking 1 te halen? Wel, de reactantie van  $C''$  maal de steilheid moet dan minstens 1 zijn, dus:

$$1 < S/\omega C'' = 10/X_{C''} \text{ als } X_{C''} = 1/\omega C'' \text{ in k}\Omega.$$

$C''$  mag bij 11 MHz blijkbaar 145 pF zijn. 'Voor de veiligheid' maken we  $C''$  een beetje kleiner: 100 pF. Bij 20 MHz moet die dan 50 pF zijn enz. Zo kom ik tot de boven reeds genoemde formule:

$$C' = C'' :: 1000/f_0 \dots (\text{pF})$$

De verhouding  $C'/C''$  zou anders gekozen kunnen worden. In de praktijk werkt 1 echter prima.

### De amplitude-stabilisatie

[Davidse]<sup>4</sup> zegt dat een koppel-C met lekweerstand toegepast kan worden als er geen hoge eisen aan de stabiliteit worden gesteld. Hij gaat er daarbij van uit dat de gate-stroom door  $R_l$  de avc-werking bewerkstelligt. In [De Beste Oscillator] hebben we reeds gezien wat voor wonderen een BAT81/3 hier doet! Davidse houdt geen enkele rekening met niet-lineaire parasitaire capaciteiten.

Hij zegt<sup>5</sup> dat de beste AVC-werking verkregen wordt bij  $R_l C_k > 20 \cdot f_0$ . Met  $C_k = 15$  pF wordt  $R_l > 150$  k $\Omega$ .

We nemen 220 k $\Omega$  om de demping op de kring niet onnodig groot te maken.

De BAT83 (81 mag ook) is cruciaal. Die zorgt voor de 'extra AVC'. Als die er niet zit, komt er zo'n slordige 20 dB meer ruis uit de oscillator!

Bij de LC-oscillator heb ik daar 6 volt mee in serie gezet. Dan komt er meer signaal uit en ruist de schakeling relatief minder. Met een Xtal kan dat niet omdat die dan ver buiten zijn specificatie gebruikt wordt.

### Dissipatie in het Xtal

Bij Xtallen in een HC-45/U-huisje vind je bij alle fabrikanten een 'werkdissipatie' van 0,1 mW! Dat is niet veel. Als je niet te veel om 'oudering' geeft (voor de langeduur-stabiliteit) mag je tot 1 mW gaan, maar dan is het wel op. In de literatuur wordt er gewaarschuwd voor allerlei ruis-uitbarstingen die kunnen optreden bij grotere vermogens....

Hoe bereken je die dissipatie? Daarvoor moeten we de kringstroom en de  $R_m$  van het Xtal weten.

Nu blijkt uit de oscillator op de source  $3 V_{tt}$  (dus over  $C''$ ) te staan als we de kathode van de BAT83 aan aarde leggen. Door  $C''$  loopt er dan zo'n 14 mA (volgens de simulator). Als de dissipatie niet groter dan 1 mW mag worden, zal de  $R_m < 5,1 \Omega$  moeten zijn!

De 11 MHz Xtallen van [QT] zitten op zo'n 20  $\Omega$ . We moeten hen dus vragen om een grote Q maar vooral om een kleine  $R_m$  omdat de spanning uit de oscillator dan groter mag zijn, ergo relatief minder zijbandruis. Boven de 5  $\Omega$  zou er zelfs een negatieve spanning aan de kathode van de BAT83 moeten. Waar halen we die vandaan?

### De Slicer

Als slicer, dat ding dat van een sinus een blok maakt, gebruikte ik vroeger een LT1016, een duur geval. Een 74HC04 doet het hier veel beter: er komt zo'n slordige 10 dB minder ruis uit. De koppel-C er naartoe is niet kritisch maar moet niet te groot zijn. 10 pF voldoet.

Als de duty cycle echt 50 % moet zijn, zal de bovenste 22k-weerstand iets kleiner moeten worden. Ongeveer 18 k. De 74HC04 is een beetje typisch geschakeld. Ik kwam steeds weer hier op uit voor de minste ruis. Als de koppel-C verwijderd wordt, oscilleert de zaak! Zelfs als het Xtal er uit is, is dat vaak het geval. 'Hoe kan dat nou goed werken?' De ingangsspanning is een paar volt, dus krijgt de 74HC04 niet zo veel tijd om te oscilleren. Ik denk dat het effect van dat bijna oscilleren de flanken lekker steil maakt en zodoende weinig of geen ruis toevoegt.

Het 'eindtrapje' bestaat uit drie invertors (domweg) parallel. Met een uitgangswaerstand van 33  $\Omega$  is de uitgangsimpedantie precies 50  $\Omega$ . Belast (met 50  $\Omega$ ) komt er dan zo'n 3 V<sub>i</sub> uit.

### De Voeding

Er zijn lieden die 10 volt op de 74HC04 zetten. Dat zal misschien kunnen maar de spec geeft maximaal 6 volt op. Als stabilisator kun je geen 78xx gebruiken, als je tenminste echt weinig zijbandruis wilt hebben. De duty cycle van de 74HC04 is sterk afhankelijk van de voedingsspanning! Ik gebruik hier 'parallel-stabilisatoren' van TentLabs voor. Ik kan me voorstellen dat je daar als echte zelfbouwer niet aan gaat beginnen. Neem in ieder geval als referentie geen zener-diode maar een paar groene LEDs in serie, die zijn nog wat minder ruiserig dan de rode.

De spanning op de oscillator moet zo'n 12 - 13 volt zijn. Ook die spanning moet 'netjes' gestabiliseerd worden.

### De Xtallen

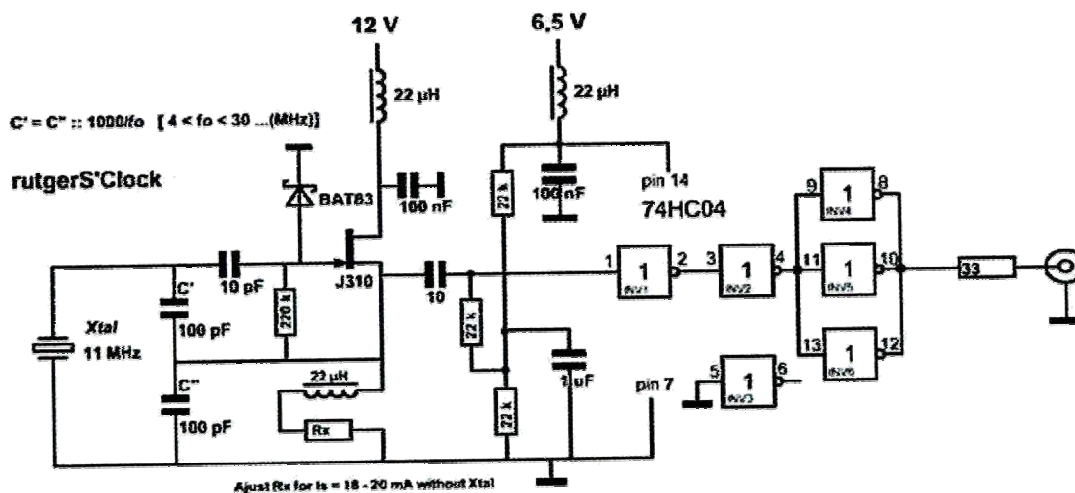
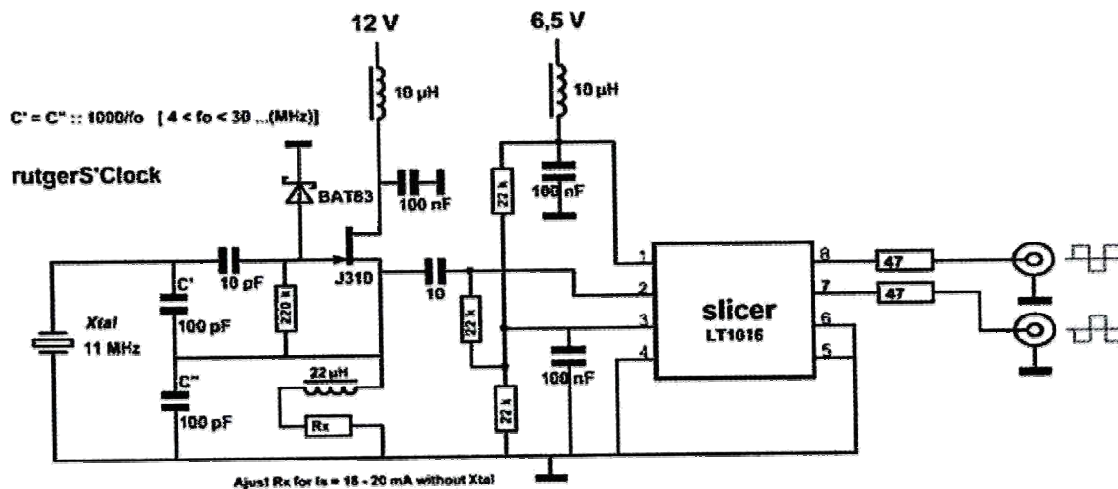
Wat voor Xtallen stop je nu in zo'n oscillator? Is elk piepsteentje goed? We hebben het natuurlijk over kwarts kristallen in HC49/U (HC51/48 zal haast niet meer lukken). Ik heb nog steeds het idee dat een groot Xtal beter gaat: je kunt er

<sup>3</sup> blz. 309

<sup>4</sup> blz. 304

<sup>5</sup> op blz. 304 middenin





tenminste meer vermogen in stoppen.

Ik heb steeds met AT-sneden gewerkt in HC49/U. De Xtallen gedragen zich niet zo netjes. Slechts zo'n 10 - 20 % is 'goed' bij afstanden kleiner dan 35 Hz van de draaggolf. Dat sterkt mij in de kwaliteit van de oscillator: het Xtal maakt duidelijk uit hoeveel ruis er uit komt (bij lage frequenties). Ik ben bij menige kristallenboer te rade gegaan. Volgens mij verkopen ze allemaal hetzelfde spul uit China, Taiwan, Korea of waar dan ook vandaan. Ze weten er geen bal van, zeker niet als het om 'close-in-noise' gaat. Ik heb eindelijk een Xtallen-boer(tje denk ik) gevonden die met mij in zee wil. Hij heeft mij tien Xtallen aangeboden voor een zeer redelijke prijs op de frequentie waarop mijn DC-ontvanger loopt die ik gebruik voor de ruismetingen. Dat bedrijf heet: QT Quartztechnik GmbH. Het bedrijf zit in de Eifel, vlak over de grens. De eerste tien Xtallen deugden niet! Na overleg bleek dat voor mijn doel de Xtal-plaatjes speciaal gepolijst moesten worden. Die Xtallen zijn inmiddels aangekomen en zijn allemaal goed. Ik heb twee (uitgezochte) Xtallen die een fractie beter zijn, maar de QT-Xtallen zijn gewoon goed, alle tien.

### Microfonie

Xtallen kunnen behoorlijk microfonisch zijn. De mechanische eigen-resonantie van de Xtal-ophanging resonanceert zo tussen de 500 Hz en 1 kHz. De QT-Xtallen zijn niet zo microfonisch. Het is echter aan te bevelen om het Xtalletje zelf te

verzwaren (lood) en verend op te hangen (schuim-polyethyleen). Het spreekt vanzelf dat de draadjes aan het Xtal geen contactgeluid moeten overbrengen.

### Meten?

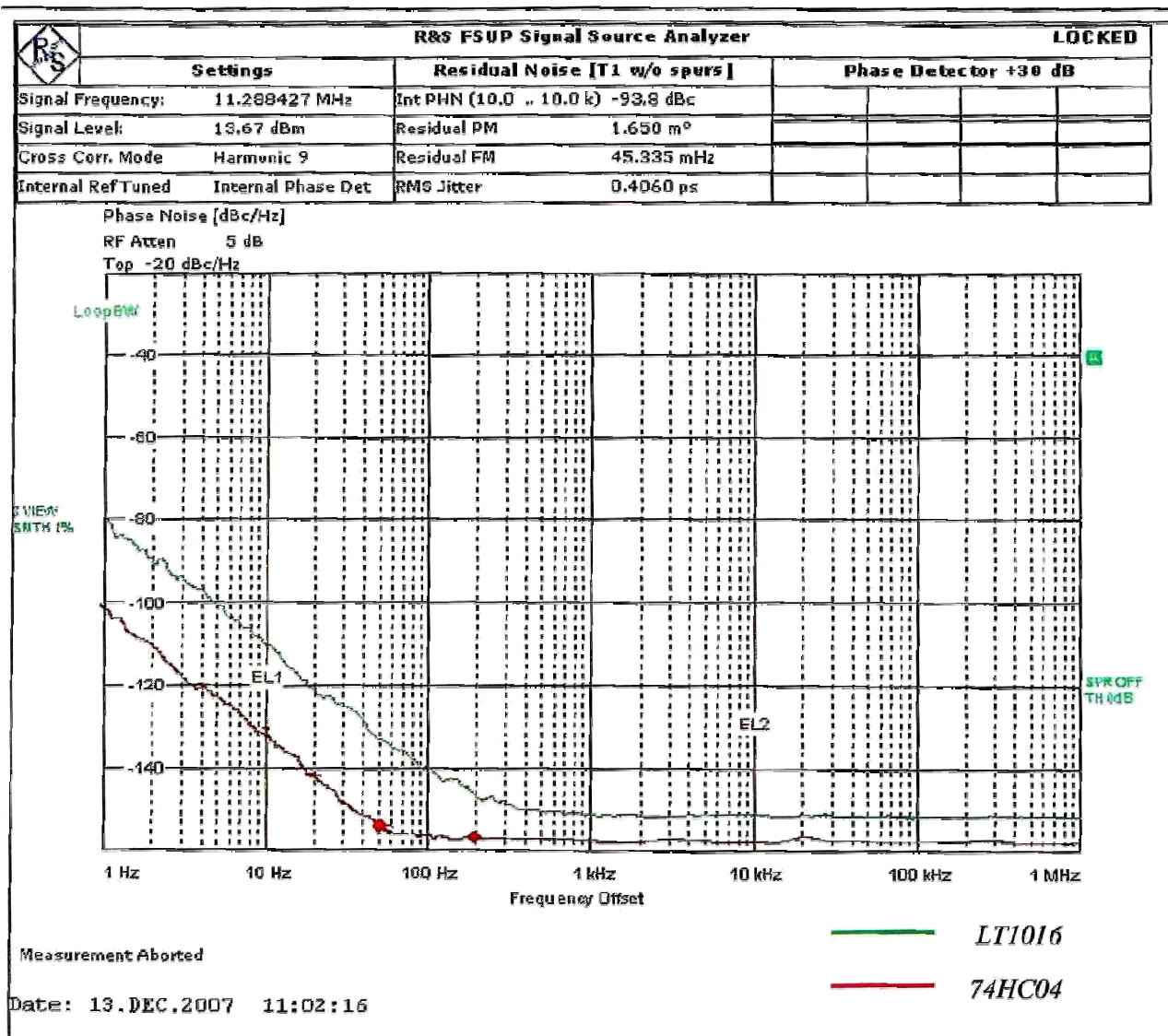
Ja, toch meten dus. Hoe ik dat precies doe, komt nog wel eens een keer, maar ik kan natuurlijk wel iets over de methode zeggen.

Mijn 'faseruis-meter' is een DC-ontvanger. In het front end zit een DBM. Die wordt met twee 'dezelfde' Xtal-oscillatoren gestuurd. De een 10 dB harder dan de ander. De hardste, de LO, kan zo'n 100 Hz verstemd worden met een varactor. Er zit een PLL in die de twee eenmaal ge-lockte oscillatoren in de pas houdt.

Aan die mixer hangt een LT1028<sup>6</sup> waarvan het uitgangssignaal gesplitst wordt in twee 'kanalen', een van 200 Hz tot 24 kHz met 90 dB versterking en een van 35 Hz tot 160 kHz met zo'n 50 dB versterking. Met deze kanalen kan ik geïkt meten.

Als ik wil weten wat er zich onder de 35 Hz afspeelt, kijk ik met de oscilloscoop naar de varactor-spanning. Daar is 'alles' boven de 35 Hz uitgefilterd (met 6 dB/octaaf). Ik kan dat 'kanaal' natuurlijk nietijken.

<sup>6</sup> de allerbeste op amp als het om ruis gaat bij lage impedanties (50 Ω)



Figuur2 De faseruis van de Xtal oscillator en de 'blokvormer'

Wat je daár ziet... Het lijken soms wel vulkanische uitbarstingen. Sommige Xtallen beginnen daar mee en worden rustig na een minuut, andere zijn direct rustig, en de echt slechte komen nooit tot rust. Het gekke is dat er niet zo veel verband is tussen de ruis boven de 200 Hz en die onder de 35 Hz. Het ene merk scoort wat beter dan het andere, maar 'betrouwbaar' zijn ze geen van alle, uitgezonderd die gepolijsten van [QT].

Hoe dat komt, weet ik inmiddels: 'polishing the blanks'. Op speciale aanvraag (low noise) wordt dat bij QT gedaan. Ik veronderstel dat de Xtal-schijfjes (extra) gepolijst zijn voordat de elektroden opgedamp worden.

### Resultaten

In de plots van figuur 2 zijn twee krommen te zien. De bovenste is gemeten met de LT1016 als slicer. De onderste met de 74HC04. Commentaar overbodig.

Op Internet vind ik vaak veel gunstiger resultaten van Xtal-oscillatoren waar **nooit** de schakeling bij gegeven wordt. Vaak zijn dit ook *gesimuleerde* resultaten. Nu zullen er best goede (peperdure) HF-simulators bestaan, maar of die alle eilende van de praktijk meenemen, hangt sterk van de ge-

bruiker af.

De hier getoonde oscillator is tig keren gebouwd en gemeten op een R&S-apparaat, dat daar speciaal voor geleend is indertijd. De rutgerS'Clock is in de audio-wereld in ieder geval omarmd als 'de beste'. Dat kun je horen aan het klankbeeld. Zo slecht zal hij dus niet zijn en papier (lees Internet) is geduldig nietwaar?

Waar ik nu benieuwd naar ben is de toepassing van deze schakeling bij onze Giga-Hertz-ers. Hebben we die onder onze lezers? Toe, probeer het eens, dan heb ik meer zekerheid over de kwaliteit. Voor digitale audio (ADC en DAC) komt het vooral aan op de faseruis binnen 50 Hz van de carrier. Na tig keer vermenigvuldigen zal dat ook belangrijk worden, toch?

Ik kan, met mijn huidige apparatuur niet veel verder meten dan zo'n -155 dBc/Hz, dus weet ik niet precies wat de 'veraf-ruis' op 10 of 100 kHz afstand is. Het zou kunnen dat dit ding het daar minder goed doet dan de op Internet zo links en recht getoonde resultaten. Door Ulrich Rohde ben ik zo'n dertig jaar geleden al eens op het verkeerde been gezet dus ben ik, ondanks zijn indrukwekkende staat van dienst, toch een beetje voorzichtig geworden met zijn uitkomsten.



### Nog te verbeteren?

"Ja, maar je moet anders uitkoppelen, zodat je het Xtal zelf als bandfilter gebruikt". Dat heb ik natuurlijk geprobeerd. Je moet echter niet de illusie hebben dat het Xtal nog iets filtert onder de 35 Hz. De schakeling wordt ingewikkelder *dus* komt er meer ruis uit. Bovendien begrijp ik niet zo goed waarom spannings-uitkoppeling slechter zou zijn dan stroom-uitkoppeling.

"Die lage frequenties moet je tegenkoppelen in de oscillator, dat doen al die goeroes". De ellende is dat ze nooit vertellen hoe. De eenvoudige schakelingen werken geen fluit beter dan 'mijn extra AVC'. Misschien is er met de uitgangsspanning van een VCXO wat aan te vangen, maar dan moet je wel weten welke van de twee oscillatoren de slechtste is. Meer dan een paar dB is er niet te verdienen en ik kom resultaten tegen die meer dan 10 dB beter zijn.

"Ik heb wel eens twee Xtallen parallel gezien in een apparaat. Kun je daar niets mee?" Ik heb geen idee waarom zo iets gedaan is. Wederom, onder de 35 Hz gaat het alleen maar slechter.

Het enige wat ik ter verbetering kan bedenken is dat ik de drain-stroom en de stroom door de lekweerstand (220 k) eens zichtbaar ga maken om te zien of er een correlatie is met de faseruis onder de 35 Hz. Wellicht is hier nog een gunstige tegenkoppeling uit te distilleren.

### Conclusies

Met de destijds gevonden zeer eenvoudige schakeling voor LC-oscillatoren is een kwalitatief goede, zo niet zeer goede Xtal-oscillator te maken. Op deze schakeling was ik niet gekomen zonder de polemiek met wijlen Klaas Spaargaren PAoKSB in Electron indertijd. Ik kan dat niet genoeg bena-

drukken! De laatste stap: het maken van een 'extra AVC' met een schottky barrier diode, de RC-tijd en waarde van de Ck-RI, heeft hij niet meer mee mogen maken. Ik mis zijn commentaar.

Voor elk AT-Xtal, ook de minder goede, is deze schakeling beter dan welke andere! Zeker in radio-toepassingen is de zijbandruis op afstanden groter dan 1 kHz steeds te verwaarlozen.

[Davidse] theoretiseert veel, ook over oscillatoren. De uiteindelijke schakeling die promovendus [Boon] ontwikkeld heeft, geeft theoretisch al zulke bedroevende resultaten dat ik er niet over pieker om de complexe schakeling te maken.

### Litteratuur:

[Davidse] *Analog Electronic Circuit Design*, Jan Davidse, ISBN 0-13-035346-9, eerste uitgave 1991.

[Boon] *Design of High-Performance Negative-Feedback Oscillators*, C.A.M. Boon, Proefschrift TU Delft, 19 september 1989, bij prof. dr. ir. J. Davidse.

[De Beste Oscillator] *QRP Nieuwsbrief nr 116 - december 2005*, PAoSU

[De Beste Oscillator Beter Begrepen] *QRP Nieuwsbrief nr 120 - december 2006*, PAoSU

[web site] [by-rutgers.nl](http://by-rutgers.nl) of [pa0su.nl](http://pa0su.nl), [www](http://www) hoeft er niet voor.

[QT] *QT Quartztechnik GmbH*. Alte Darscheiderstraße 15, 54550 Daun, Duitsland. [www.quartztechnik.com](http://www.quartztechnik.com)

Succes met dé hobby,  
73 de PAoSU, Herbert.