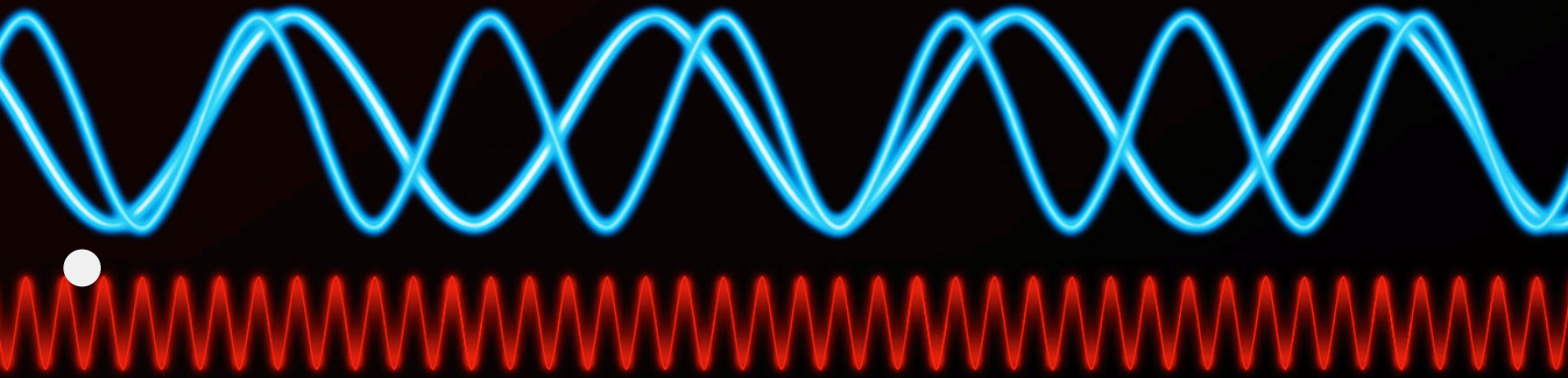


Referentie-sinusgenerator



Hoe bouw je met weinig componenten een generator met een zo laag mogelijke vervorming? Hier volgt een praktijkverhaal met veel experimenten die resulteerden in een state-variable oscillator met een vervorming die ruim onder 0,001% ligt.

Voor het meten, ijken en testen van audio- (meet-)apparatuur is de beschikking over een testoscillator die in staat is om een zo zuiver mogelijk, vervormingsarm sinussignaal (van bijvoorbeeld 1 kHz) te leveren in feite onmisbaar. Tegenwoordig is een voor de hand liggende oplossing om de geluidskaart van een PC in te zetten als sinusgenerator. Samen met een van de vele verkrijgbare (freeware) programma's is het namelijk eenvoudig om een gedefinieerde sinus uit de DAC van de geluidskaart te krijgen. Als we echter de specificaties van een goede geluidskaart (zelfs die met een 24-bits resolutie) onder de loep nemen, vallen de opgegeven waarden voor de vervorming nogal tegen. Zelfs een duurder kaart of (beter nog) een externe geluidsadapter die via USB wordt gekoppeld, levert signalen met een THD die tussen 0,01% (-80 dB) en 0,003% (-90 dB) ligt. Het genoemde THD-getal geeft de verhouding tussen de spanning van het sinussignaal (de grondtoon) en alle stoorcomponenten weer. Die stoorcomponenten kunnen onder andere bestaan uit harmonischen, ruis en niet-harmonische fluitjes en piepjes. In de praktijk blijkt dat de vervorming van

de uitgang van een geluidskaart vaak verpest wordt door allerlei stoorproducten die optreden binnen de audio-bandbreedte. In ieder geval waren bij mij de hobby-PC's (een desktop en twee oude laptops) met ingebouwde geluidskaart ongeschikt voor het leveren van iets wat op een schoon signaal leek.

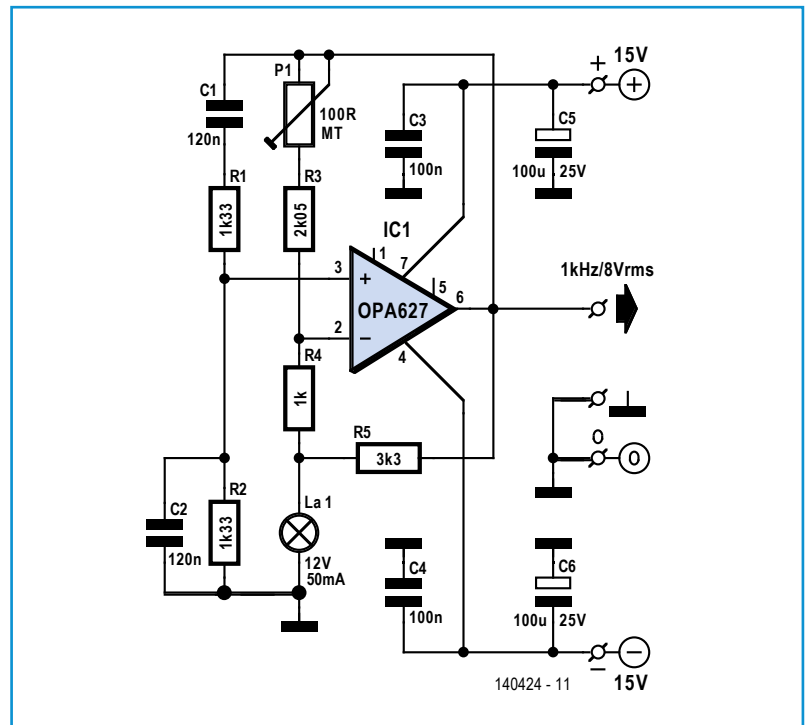
Lage vervorming met weinig onderdelen

Zou het mogelijk zijn om met een paar onderdelen een sinusgenerator te maken die beter presteert? Een generator die een signaal levert met een vervorming in de buurt van 0,001% (-100 dB) of lager, dat zou heel mooi zijn. Met een sinussignaal met een dergelijk lage distorsie heb je een bruikbaar referentiesignaal, in ieder geval voor de audio-metingen die ik voor ogen had. Omdat er genoeg Elektor-lezers zijn die ook graag experimenteren met analoge schakelingen, wil ik wat verder ingaan op de schakelingen en ontwerpen die je op je zoektocht tegenkomt. Het heeft immers nog altijd zijn charme om met een paar onderdelen, zonder dat je met firmware of software aan de slag moet, iets werkends

Hein van den Heuvel
(Nederland)

in handen te krijgen. En voor meetapparatuur blijft het gewoonweg praktisch om over een stand-alone apparaatje te beschikken, dat werkt zonder dat je er een PC bij moet slepen. De uitdaging was voor mij om een nabouw-vriendelijke sinusgenerator te bouwen met een minimaal aantal componenten, met een minimale prijs. O ja, en verder liever geen afregeling. De eerder genoemde wens om de vervorming beneden 0,001% (-100 dB) te krijgen, laten we natuurlijk ook overeind. Als onze voorkeur uitgaat naar een ontwerp met een minimum aan componenten, ligt het meest voor de hand om te beginnen met een klassieke Wienbrug-oscillator. Veel nuttige informatie hierover is te vinden in een application note van de firma Linear Technology, geschreven door Jim Williams [1]. Hierin worden een paar voorbeelden gegeven van oscillatoren met een Wienbrug. In zijn simpelste vorm wordt, naast de Wienbrug, een opamp gebruikt als versterker, terwijl een ordinaire gloeilamp dient als amplitude-stabilisatie. Een gloeilamp in een moderne elektronische schakeling? Dat is misschien niet zo vreemd als je bedenkt dat de gloeilamp in feite dienst doet als een spanningsafhankelijke weerstand. Door gebruik te maken van de eigenschappen van de gloeidraad verkrijgen we een eenvoudige vorm van amplitude-regeling. Immers, hoe hoger de spanning over de lamp, des te hoger de dissipatie, en dat betekent een hogere temperatuur van de gloeidraad. Net zoals de meeste andere metalen heeft de weerstand van het wolfram van de gloeidraad een positieve temperatuurcoëfficiënt: Een hogere temperatuur resulteert in een hogere weerstand van de draad. De gloeidraad gedraagt zich daarmee als een PTC-weerstand. Door de gloeilamp op te nemen in een terugkoppelcircuit kan een regeling worden verkregen die de versterking zal laten afnemen bij stijgende amplitude van de sinus. Als de rondgaande versterking dan kleiner dan 1 wordt, zal de amplitude weer afnemen, Na enige tijd wordt een evenwicht bereikt bij een bepaalde amplitude. Zo wordt voorkomen dat de versterker zelf gaat begrenzen. Dat is namelijk onmogelijk zonder dat de vervorming onacceptabel hoog wordt.

In het verhaal van Linear Technology levert de simpelste Wienbrug-oscillator al meteen een signaal met een vervorming (THD) van 0,0025% (-92 dB). Helemaal niet slecht! De

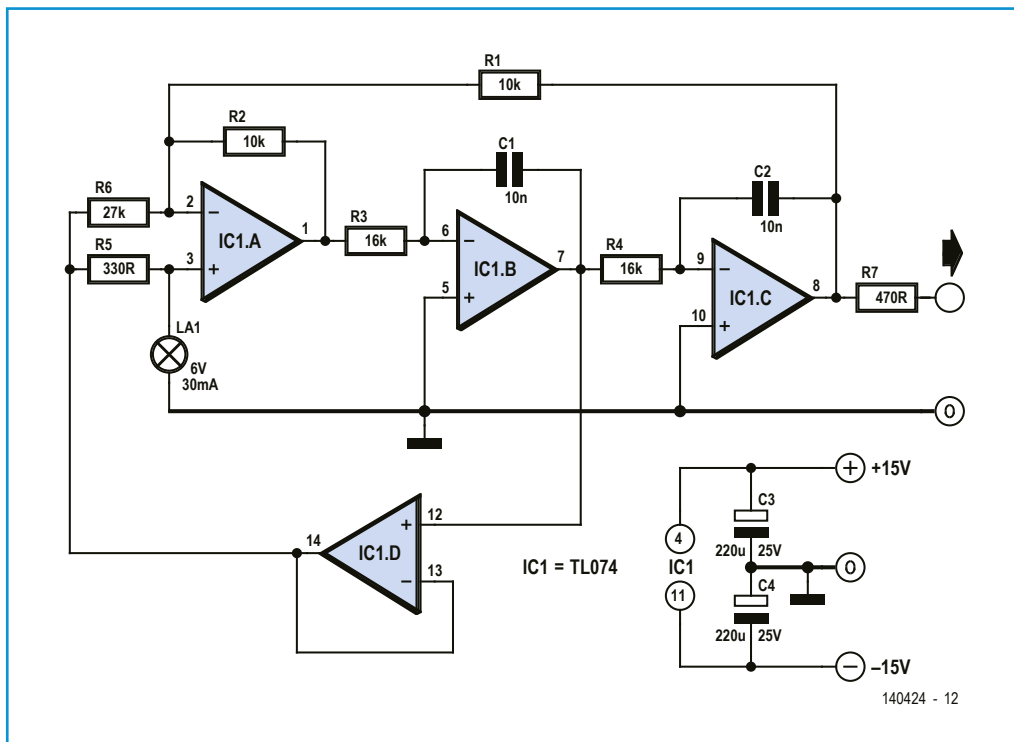


vervorming wordt voor het merendeel veroorzaakt door de lamp. Dat komt door het feit dat de dissipatie van de lamp varieert gedurende de periode van de sinus. Daarmee varieert de temperatuur van de draad in het ritme van de sinus en dus ook de weerstand van de draad. Het resultaat is een vervorming die voornamelijk een derde-orde component laat zien. De grootte van de vervorming is mede afhankelijk van de thermische 'traagheid' van de gloeidraad. Die is onder andere afhankelijk van de (gemiddelde) temperatuur van de gloeidraad. Het is lastig, zo niet onmogelijk, om de grootte van de vervorming van te voren vast te stellen. Dat zal dus experimenteel bepaald moeten worden. In de praktijk betekent het dat een acceptabel compromis moet worden bereikt tussen vervorming, regelsnelheid en amplitudestabiliteit.

Spotsinus-generator

Als we een lage vervorming verkiezen ten koste van de amplitudestabiliteit, dan kan met iets meer onderdelen een Elektuur-ontwerp van stal gehaald worden: Een eenvoudige spot-sinusgenerator is in Elektuur alweer 20 (!) jaar geleden beschreven [2]. De in dit ontwerp gebruikte opamp (zie **figuur 1**) kost tegenwoordig meer dan € 20; daarom heb ik allereerst geprobeerd om deze spotsinus-

Figuur 1.
Spot-sinusgenerator uit
Elektuur 11-94.



Figuur 2. State-variable sinusgenerator met lampje als stabilisatie-element.

generator na te bouwen met een goedkopere opamp, zoals ook in het oorspronkelijke artikel wordt voorgesteld.

De resultaten vielen niet tegen: met een van de twee opamps in een TL082 werd een THD van -96 dB bereikt en met een NE5532 kwam ik zelfs op -105 dB. Voor mij prima geschikt. Toch was er een addertje onder het gras: die lage vervormingswaarde kon alleen bereikt worden na enig experimenteerwerk. De componentenkeuze van die schakeling bleek nogal kritisch, en ook de afregeling van de amplitude komt erg nauw. Het is lastig om de amplitude van de oscillator uit dit ontwerp te 'temmen'. Bij stijgende omgevingstemperatuur gaat de amplitude verder snel naar beneden. Dat is te verwachten, omdat het arbeidspunt in deze oscillator zodanig is dat de temperatuur van de gloeidraad erg laag ligt. Dit betekent dat wisselingen van de omgevingstemperatuur behoorlijk doorwerken in de amplitude.

State-variable oscillator

Al met al wilde ik toch nog wat verder gaan met experimenteren, met als doel een wat minder kritische schakeling met een stabielere amplitude. Als alternatief voor de gloeilamp als amplitude-stabilisator zijn er allerlei schakelingen met bijvoorbeeld JFET's en

opto-couplers. Een aantal is te vinden in het eerder genoemde verhaal van Linear Technology. Sommige - maar niet alle - van die circuits leveren een lagere vervorming op. Helaas gaan die schakelingen ten koste van de eenvoud. En als je dan gebruik moet maken van dure en kritische componenten, dan schieten we ons doel voorbij.

Dan is en blijft de schakeling met het lampje toch een prima uitgangspunt. Je zou bijvoorbeeld een Wienbrug-oscillator (met lamp) als uitgangspunt kunnen nemen met daarachter geschakeld een eenvoudig bandfilter of een laagdoorlaatfilter om de harmonischen te onderdrukken. Het geheel kan op dan op eenvoudige wijze worden opgebouwd met een dubbele opamp.

Voortbordurend op de mogelijkheid om een oscillator te bouwen gevolgd door een harmonischen-filter, kwam ik uit bij een oscillatortype dat deze filtering in feite heeft ingebouwd: de 'state-variable' oscillator. Dit type oscillator werd veel toegepast in onder andere professionele audio-meetapparatuur voordat digitale technieken hier hun intrede deden. Vreemd genoeg ben ik nergens zo'n oscillator tegengekomen met een lampje als stabilisatie-element. Dan is het allicht interessant om zo'n lamp-schakeling snel even uit te proberen op

een breadboard. Met verrassend goede eerste resultaten!

Nou heeft zo'n state-variable oscillator als nadeel dat er minstens 3 opamps nodig zijn. Als we echter bedenken dat vier opamps in een 14-pens IC goed en verhoudingsgewijs goedkoop verkrijgbaar zijn, is hier wel overheen te komen.

De schakeling is weergegeven in **figuur 2**. Deze schakeling is op het eerste gezicht ingewikkeld in vergelijking met de Wienbrug-oscillator. En inderdaad, er zijn zowaar vier opamps gebruikt. Het is dan wel weer grappig om te zien dat het aantal gebruikte componenten niet veel meer is dan de eenvoudige Wien-oscillator. Het ontwerp bestaat uit één IC en 12 passieve componenten. Dat is vergelijkbaar met de spotsinus-generator uit figuur 1. Zoals u ziet, bestaat het hart van de schakeling uit de viervoudige opamp type TL074. Dit IC is een bewijs dat een stokoud ontwerp als dit heel goed zijn mannetje kan staan tussen al het modernere opamp-spul. En dat alles voor een belachelijk lage prijs. Niet zo vreemd dat dit IC in de Elektor-lijst van voorkeurscomponenten is opgenomen... De state-variable oscillator bestaat uit twee integratoren, in dit geval IC1.B en IC1.C met de bijbehorende RC-netwerken R3/C1 en R4/C2. Beide integratoren achter elkaar geven een fasedraaiing van 180°. Een inverterende versterker met een versterking van -1 (IC1.A met R1 en R2) geeft ook een fasedraaiing van 180°. Samen met de integratoren levert dit een fasedraaiing van 0° op. Als we met deze combinatie de lus sluiten, wordt verder aan de oscillatievoorwaarde voldaan als de rondgaande versterking 1 bedraagt. Als de inverterende versterker -1 maal versterkt, dan geldt voor de oscillatiefrequentie:

$$f_0 = 1 / (2\pi RC)$$

waarbij: R = R3 = R4 en C = C1 = C2

In theorie hebben we dan al een oscillator. Voor het opstarten en de amplitudestabilisatie hebben we het circuit met het lampje nodig. Dit bestaat in feite uit een brugschakeling met in de ene arm R5 en het lampje, en in de andere arm R6 en R1 parallel aan R2. Het signaal voor deze brug is afkomstig van de eerste integrator. Dit signaal heeft een fase die 90° verschoven is ten opzichte van

de ingang van de inverterende versterker. De truc is nu dat de verschillspanning van de brug de fase van de inverterende trap laat variëren. De lampschakeling regelt hier dus niet de lusversterking, maar de fase. Een bijkomend voordeel is dat de componenten in de brugschakeling geen invloed hebben op de oscillatiefrequentie.

Bij het gekozen werkpunt van het lampje moet de uitgang van de opamp ongeveer 7,5 mA stroom leveren. Een sectie van de TL074-opamp kan dit prima leveren, maar het gaat wel gepaard met wat meer vervorming. Daarom is de vierde en laatste opamp-sectie van de TL074 hier ingezet om het signaal aan de brug met de lamp te leveren. Als de brug in evenwicht is (dat is het geval als de amplitude stabiel is), dan is de vervorming van deze opamp keurig weggewerkt in het verdere signaalpad. Helaas is de vervorming die veroorzaakt wordt door het lampje wel volledig aanwezig aan de uitgang van versterkertrap IC1.A. Maar gelukkig werken de twee integratoren als een laagdoorlaatfilter. Harmonische vervorming wordt daarmee onderdrukt en dat geldt trouwens ook voor (breedband-) ruis. Dat is dan ook de reden dat het uitgangssignaal wordt afgenomen na de tweede integrator: op dat punt is de vervorming het laagst! Meer informatie over allerlei vervormingsvrije oscillatoren, en de state-variable in het bijzonder, is te vinden op diverse internet-sites [3], [4] en [5].

Componentenkeuze

Wat betreft het gebruikte lampje: Ik had als ontwerpeis dat het lamptype goed verkrijgbaar moet zijn. De keus is gevallen op een zogenaamd steeklampje ('wedge base bulb') van 6 V/30 mA. Bij dit type kun je de aansluitdraadjes heel eenvoudig terugbuigen van de fitting, waarna je de lamp gewoon op een print kunt solderen. De lampjes zijn bij diverse leveranciers verkrijgbaar; ik kocht deze gewoon bij mijn lokale onderdelenzaak. Overigens zijn diverse andere lamp-types ook prima bruikbaar, daarover later meer.

De eerste experimenten zijn gedaan met onderdelen die ik verder op voorraad had: er wordt dus om te beginnen gewoon gebruik gemaakt van doodgewone koolweerstand en de condensatoren C1 en C2 waren MKT (polyester) types. De vervorming is dan meteen al ruim onder -100 dB. Een lage vervor-

Mogelijke storingsbronnen

Hier zijn nog enkele hints bij eventuele problemen. Daarbij is het belangrijk dat u kunt bekijken wat de aard van de verstoring is. De meeste vervormingsmeters hebben daarvoor een uitgang waarmee men het residu (alles behalve de grondtoon) op een oscilloscoop kan bekijken.

- **Brom:** Dat kan komen door elektrische koppeling. In dat geval helpt het om de schakeling af te schermen. Gaat het probleem daarmee niet weg, dan is de oorzaak vermoedelijk een aardlus: allereerst is het dan belangrijk om de voeding onder de loep te nemen. De voeding mag namelijk niet direct (galvanisch) verbonden zijn met de randaarde van het net. Als dat niet te vermijden is, plaats dan 3 weerstandjes van $47\ \Omega$ in serie met de drie aansluitdraden van de voeding. Verder kan het nodig zijn om slechts één (meet-)apparaat tegelijk aan te sluiten. Dus, als u de vervormingsmeter aansluit, koppel dan de oscilloscoop (ook met de aardclip!) los.
- Vreemde 'slingers' en relatief hoogfrequente wisselspanningen in het residu kunnen duiden op **instabiliteit**. Hoewel de TL074 een redelijk 'tamme' opamp is, kan de zaak instabiel worden als de ontkoppel-elco's te ver van de opamp verwijderd zijn. De elco's moeten verder van goede kwaliteit zijn (lage ESR). Bij twijfel kan een kleinere capaciteit van bijvoorbeeld 100 nF parallel aan elke elco worden opgenomen. Let ook op al te lange bedrading en houd met name de aardrail kort en overzichtelijk. Wees verder ook bedacht op instraling van radiozenders in de buurt. Afscherming is noodzakelijk als u daar last van hebt.
- **Ruis:** Dit kan veroorzaakt worden door ruis op de voedingslijnen, afkomstig van het voedingsapparaat. In dat geval kan het helpen om twee weerstandjes van bijvoorbeeld $47\ \Omega$ in serie met beide voedingslijnen te zetten. Let ook hier op de kwaliteit van de elco's.

ming blijkt dus prima bereikbaar met goedkope standaard-componenten!

Door de grote tolerantie van deze onderdelen kan de oscillatorfrequentie wel behoorlijk afwijken van 1 kHz. Verder is deze frequentie behoorlijk temperatuurafhankelijk. Voor de condensatoren heb ik uiteindelijk gekozen voor betaalbare polypropyleen-filmcondensatoren van Wima uit de FKP-2 serie met een tolerantie van 2,5%. Als voor alle weerstanden dan 1% metaalfilmtypen worden gebruikt, komt de uitgangsfrequentie op 1 kHz met een afwijking van maximaal enkele tientallen Hertz. De frequentie blijft stabiel bij wisselende temperatuurverschillen, ook veranderingen in het (brug-) circuit bij het lampje zie je niet terug als een frequentievariatie. Wilt u de frequentie toch afregelen op 1 kHz exact, dan kan bijvoorbeeld een 25-slags instelpotmeter van $500\ \Omega$ tussen R1 en R2 worden geplaatst. De loper van de potmeter wordt dan verbonden met de inverterende ingang van U1A.

Om de nabouwzekerheid van de schakeling te testen, heb ik in deze schakeling drie lampjes uitgeprobeerd. De amplitude van de uitgang is, afhankelijk van de geteste lamp, tussen 2,81 en 3,14 V. Dat is geen verontrustende spreiding; in feite is dit te verwachten door

de tolerantie in de weerstand van lampjes. De weerstandswaarden van R5 en R6 zijn verder niet kritisch, voor deze weerstanden kunt u ook koolweerstand gebruiken. Verder heb ik verschillende TL074-IC's uitgeprobeerd van TI en STS, maar daar konden geen verschillen worden vastgesteld. Vervolgens werd nog een test gedaan om de gevoeligheid voor voedingsspanningsvariaties te bepalen. De voeding moest tot minder dan $\pm 10\ \text{V}$ worden teruggeregeld om een verslechtering in de THD vast te stellen. Dan tot slot de temperatuurtest: met een haardroger op een flink hete stand is het hele breadboard 'gemarteld'. De temperatuur die de onderdelen bereiken is weliswaar ongedefinieerd op deze manier, maar het is wel een goede en snelle test om een indruk te krijgen over de gevoeligheid voor temperatuurvariaties van een schakeling. Het resultaat: De vervorming blijft constant laag, de amplitude vermindert met ongeveer 0,3 dB.

De gemeten vervorming van de oscillator ligt in de buurt van 106 dB (0,0005 %). Ik moest het breadboard daarbij afschermen met een geaarde metaalplaat onder de bodem om brom tegen te houden. Er is nog een simpele manier om de vervorming lager te krijgen: neem voor R7 een weerstand van 1,5 k Ω en

monteer een condensator van 100 nF tussen de uitgang en massa. In mijn opstelling kon ik dan met enige moeite een vervorming van -108 dB (0,0004 %) meten.

Zeker als men beschikt over de juiste meet-apparatuur, leent deze schakeling zich bij uitstek voor verdere experimenten. Zelf werd ik gehinderd door begrenzingen in de meetgrens van de distorsiemeting, waardoor ik misschien niet het onderste uit de kan heb weten te halen.

Andere lampjes

Tijdens de experimenten zijn ook verschillende andere lampjes uitgetest. In principe moet een lampje met een spanning van hoogstens 10 V en een stroom van minder dan 40 mA toe te passen zijn. Als richtlijn kan worden aangehouden dat in een schakeling als deze de spanning over het lampje $1/10$ moet zijn van de nominale lampspanning (U_L); de stroom door het lampje heeft dan een waarde van ongeveer een kwart van de nominale brandstroom (I_L).

Als we uitgaan van een uitgangsspanning van 3 V, dan kunnen we de waarden van R5 en R6 als volgt berekenen:

$$R5 = \frac{\left(3V - \frac{1}{10}U_L\right)}{\frac{1}{4}I_L}$$

en
$$R6 = \left(\frac{30V}{U_L} - 1\right) \cdot 5k\Omega$$

Waarbij U_L = Nominale lampspanning, I_L = nominale lampstroom

De berekende waarden zijn richtwaarden. In de praktijk bereik je met deze richtwaarden een goed werkende oscillator, tenminste met de verschillende lampjes die ik getest heb. Voor de beste resultaten zult u moeten experimenteren met deze waarden, omdat de U-I-karakteristiek van een bepaalde lamp niet exact vastligt. Op deze manier kunt u spelen met de uitgangsspanning, vervorming en inschakeltijd (de tijd die verloopt tussen het inschakelen van de voedingsspanning en het bereiken van een signaal met een minimale vervorming en een stabiele amplitude).

Van de verschillende lampjes die werden uitgetest, zijn in ieder geval de volgende twee typen redelijk tot goed verkrijgbaar:

- Draadlampje 10 V/14 mA, typenr. 1869. Te koop o.a. bij Mouser (606-CM1869), Digi-Key (289-1227-ND). Redelijke resultaten werden verkregen met $R5 = 330 \Omega$ en $R6 = 10 k\Omega$. Met dit lampje is de inschakeltijd aan de hoge kant (meer dan 5 seconden).
- Draadlampje 5 V/21 mA typenr. 6022: Mouser (606-6022), Farnell (2078333). Goede resultaten werden verkregen met $R5 = 470 \Omega$ en $R6 = 33 k\Omega$.

Een laatste opmerking nog over de keuze van het lampje: Het gebruik van een fietsachterlichtlampje (6 V/50 mA) is niet aan te raden. Ik heb twee van deze lampjes gemeten en die hadden allebei een stroomopname bij 6 V die hoger lag dan 70 mA!

(140424)

Weblinks en literatuur

- [1] Bridge Circuits, Application Note 43, Linear Technology Corp.: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an43f.pdf>
- [2] Elektuur 11-94, Spotsinus-generator
- [3] <http://sound.westhost.com/articles/sinewave.htm>
- [4] www.moorepage.net/RC.html
- [5] www.jensign.com/RMAA/Wien_RMAA/