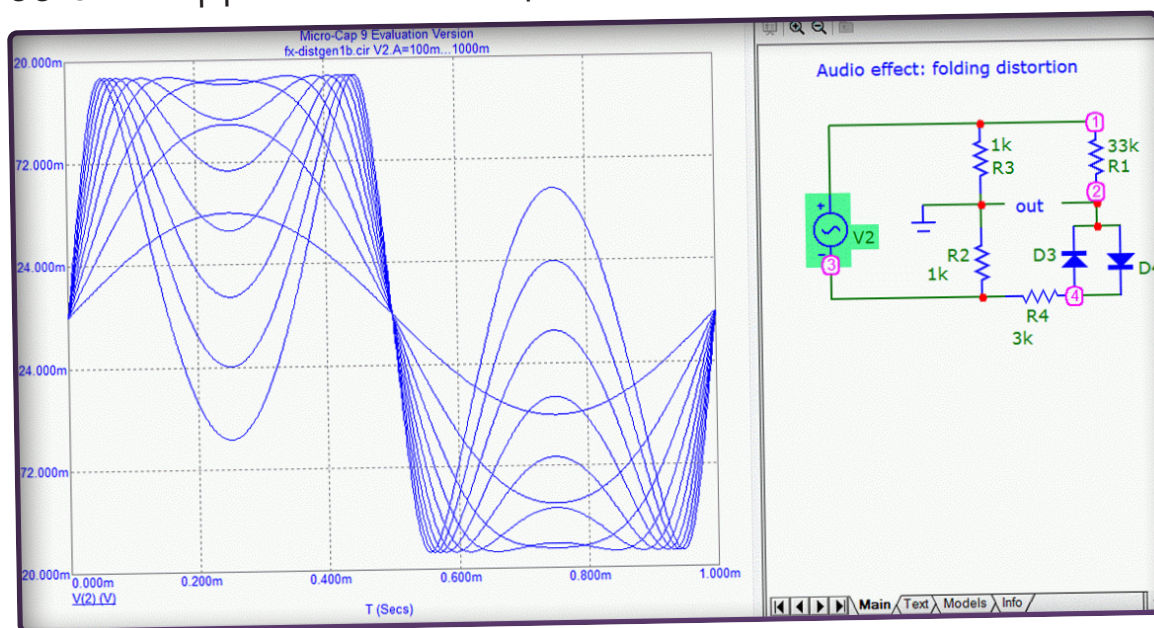


Simuleren met Micro-Cap

eerste stappen in een complexe wereld



Raymond Schouten (Nederland)

Een simulator hoort thuis in de gereedschapskist van elke elektronicus, net als een voeding, een multimeter en een oscilloscoop. En net als elk ander gereedschap moet je, voordat je er goed mee uit de voeten kan, er eerst mee leren omgaan. In dit artikel laten we zien hoe je aan de slag kunt met de freeware-simulator Micro-Cap.

Waarom zou je simuleren?

Het gebruik van een simulator kan veel tijd besparen bij het testen van ideeën of het dimensioneren van componenten. Het is ook een goed leer- en debug-gereedschap dat aanschouwelijk maakt wat er in een schakeling gebeurt.

Simulatiesoftware zoals LTspice (Analog Devices), Tina (Texas Instruments) en Micro-Cap gebruiken de tekstgebaseerde SPICE-

code die in 1973 is ontwikkeld aan de Universiteit van Californië, Berkeley. Moderne software voegt daar voornamelijk een grafische interface aan toe. Een belangrijk deel van dit artikel geldt daarom voor alle drie genoemde simulatoren, vooral als het gaat om het vermijden van simulatiefouten.

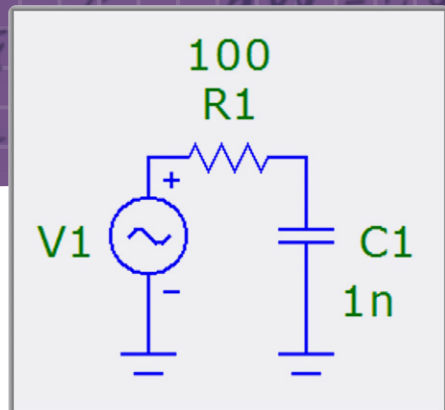
De simulator die in dit artikel wordt geïntroduceerd is Micro-Cap [1]. Het is een simulator van professionele kwaliteit (\$ 4500) die als

freeware werd uitgebracht nadat de product-ontwikkeling ervan was gestopt. Vergeleken met andere gratis simulatoren heeft het vrij geavanceerde functies. Het nadeel is het risico van veroudering omdat er niet meer aan gewerkt wordt. Voorlopig kun je deze software gratis vinden op [1].

Met Micro-Cap kun je schakelingen tekenen en de signalen erin bekijken terwijl je aan 'knoppen' draait om parameters te veranderen. Het wordt geleverd met een grote bibliotheek met componentmodellen (inclusief vacuümbuizen!). Ontwerptools voor actieve en passieve filters zijn ingebouwd. Een leuk detail voor audiotoeepassingen is dat je de golfvorm van je gesimuleerde schakeling kunt beluisteren.

Hoe simuleer je?

Het simuleren van een schakeling is als het bouwen ervan op breadboard. Je plaatst de componenten, verbindt ze met elkaar om er een schakeling mee te maken, voegt



Figuur 1. Mijn eerste schakeling: een eenvoudig RC-laagdoorlaatfilter.

voedingsspanningen toe en sluit (optioneel) een signaalbron aan. Vervolgens kun je de signalen meten met een oscilloscoop (in het tijd domein) of met een spectrumanalyzer (in het frequentiedomein). Meer details hierover zijn te vinden in het kader **Verschillende analyses**.

Je eerste schakeling tekenen

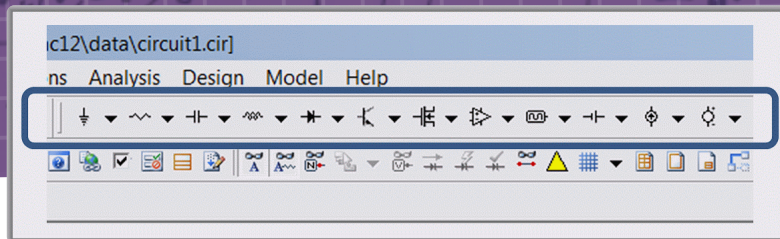
Na het opstarten van Micro-Cap beginnen we met het tekenen van een eenvoudig RC-laagdoorlaatfilter en simuleren we de frequentierespons ervan zoals getoond in **figuur 1**. Er zijn verschillende manieren en snelkoppelingen om componenten aan de schakeling toe te voegen (zie het kader **Waar zijn de componenten?**). Voorlopig gebruiken we de componentenbalk aan de bovenkant van het scherm (**figuur 2**).

Klik kort met de linker muisknop op het weerstandssymbool en verplaats de muiswijzer naar het lege werkblad (klik eventueel op het pijltje of driehoekje rechts van de symboolknop voor een andere oriëntatie). Er verschijnt een weerstandssymbool. Klik nogmaals met de linker muisknop om de weerstand op de gewenste positie in het werkblad te plaatsen. Voer in het venster dat nu wordt geopend een waarde in van **100** in het veld **Value** bovenaan. Sluit het venster met de knop **OK** of door resoluut op de Enter-toets te drukken.

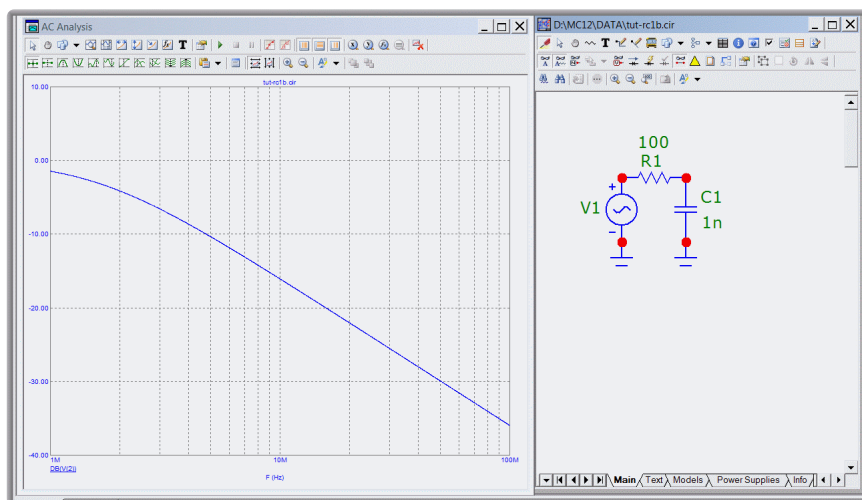
Herhaal deze procedure voor een condensator; vul voor diens waarde **1n** in. Als je de condensator zo plaatst dat een van zijn aansluitingen een van de aansluitingen van de weerstand raakt, worden ze automatisch met elkaar verbonden.

Vervolgens voegen we een sinusgenerator of -bron toe door op **Component** in het hoofdmenu te klikken en vervolgens **Analog Primitives Waveform Sources Sine Source** te selecteren. Kies **GENERAL** in de lijst rechts van het eigenschappen-venster van de bron en klik op **OK**.

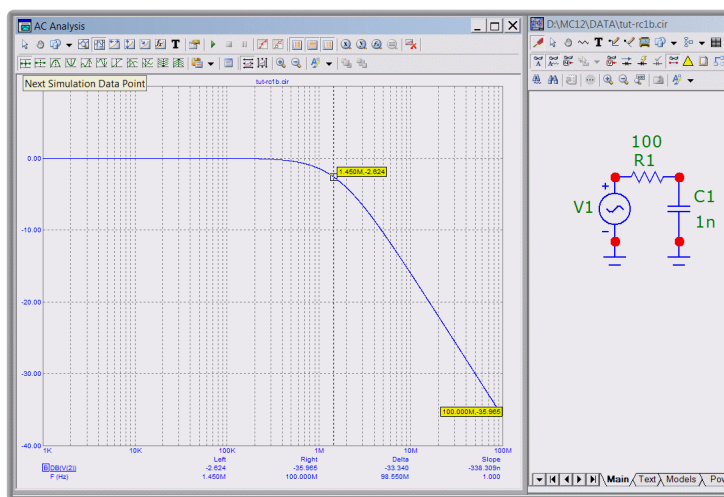
Maak de schakeling af door de massasymbolen uit de componentenbalk toe te voegen aan de condensator en de signaalbron.



Figuur 2. Micro-Cap wordt geleverd met een onderdelenbalk.



Figuur 3. Als je op het RC-knooppunt klikt, verschijnt de overdrachtcurve van het filter.



Figuur 4. Pas de grenzen van de grafiek aan om te zien wat je wilt zien.

Als je de componenten verder uit elkaar hebt geplaatst, moet je ze nog met elkaar verbinden. Dat kan met de knop **Wire Mode** of door op **Ctrl-W** te drukken. Om een draad te tekenen, klik je op het beginpunt van de draad en sleep je, terwijl je de linker muisknop ingedrukt houdt, de muiswijzer naar het eindpunt van de draad.

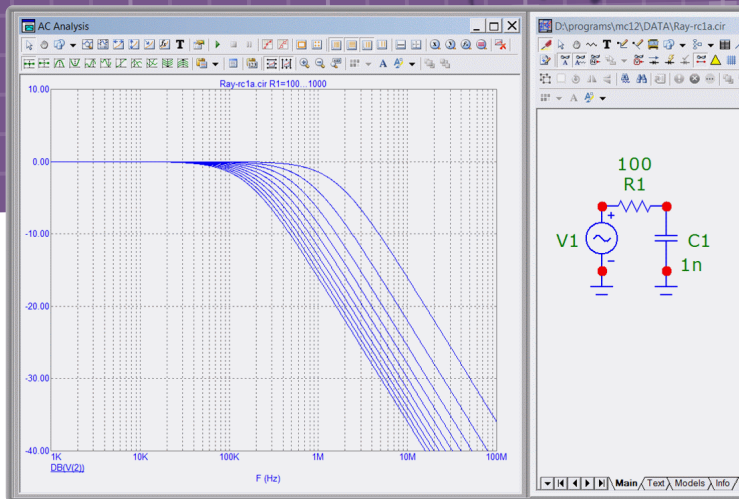
Simuleren maar!

We zijn nu klaar om een simulatie uit te voeren. In het menu **Analysis** kies je **Probe AC...** wat je naar de analysemodus brengt, klaar om te 'meten'. In deze modus kun je het getekende schema niet meer veranderen, alleen de componentwaarden. De rode

stippen in de schakeling zijn de knooppunten. Door op een knooppunt te klikken, verschijnt een grafiek in het venster **AC Analysis**, zoals in **figuur 3**.

Dit is een grafiek met de standaard frequentie-instellingen, maar we willen een grafiek die begint bij een lagere frequentie. Om dit te bereiken, kies je **Limits...** uit het **Probe**-menu. Verander de **Frequency Range** in '100Meg, 1k' (het formaat is 'hoog, laag') en klik op **Close** om af te sluiten. De grafiek verandert in die van **figuur 4**. We zien nu zowel de doorlaatband van het filter (DC tot 1 MHz) als de stopband (alles boven 1 MHz).

Je kunt de datapunten in de grafiek aflezen met behulp van een cursor. Klik linksboven op



Figuur 5. Door de waarde een parameter (hier de waarde van R1) stapsgewijs te veranderen, kan de invloed ervan op de overdrachtsfunctie van de schakeling zichtbaar worden gemaakt.

de knop *Next Simulation Data Point* boven de grafiek en er verschijnt een cursor die je kunt verplaatsen.

Simulatie versus werkelijkheid

Volgens de grafieken in de figuren 3 en 4 dempt ons filter kennelijk alles boven 1 MHz. Dat zou betekenen dat dit filter alle frequenties tot oneindig onderdrukt. We weten dat dit in werkelijkheid niet waar is. Waarom is het dan wel zo in de simulatie?

De reden is dat een simulator ideale componenten veronderstelt. Als je het werkelijke gedrag van een schakeling wilt benaderen, moet je de onvolkomenheden van zowel de gebruikte componenten als van de echte wereld toevoegen door verwaarde parasitaire elementen 'in te bouwen'. Zie het kader **Beperkingen van componentmodellen** voor details over hoe je je simulatie meer op een echte schakeling kunt laten lijken.

Een componentwaarde wijzigen in de analysemodus

In de analysemodus kun je de waarden van de componenten nog wijzigen. Daartoe moet je overschakelen naar de selectiemodus door op de knop met de muiswijzer linksboven in het schakelingvenster te klikken (je kunt ook Ctrl-E intoetsen). Nu kun je op een component(-waarde) klikken en deze op dezelfde manier wijzigen als voorheen. De simulatieresultaten worden automatisch bijgewerkt. Als je ergens anders in de schakeling wilt meten, moet je terugkeren naar de *Probe*-modus door op de *Probe*-knop te klikken.

Een parameterwaarde stapsgewijs veranderen

Een krachtige eigenschap van een simulator is dat de waarde van een of meer parameters stapsgewijs kunt veranderen en de resultaten kan weergeven in de vorm van een reeks

Hoeveel is 'M'?

In SPICE-taal staat M voor milli (10^{-3}), dus als je een weerstandswaarde instelt op 1 Mohm, krijg je 0,001 Ω ... Je kunt MEG gebruiken voor mega of 10^6 .

grafieken. Laten we bijvoorbeeld de waarde van weerstand R1 stapsgewijs veranderen alsof het een potentiometer is, om te zien wat het afstembereik is voor een bepaalde sweep. We zullen de afsnijfrequentie van het filter 'sweepen' door R1 in stapjes van 100 Ω te veranderen van 100 Ω naar 1000 Ω . Selecteer daartoe *Stepping...* in het *Probe*-menu. Selecteer R1 in het *Step What*-vak. Voer waarden in voor de velden *From*, *To* en *Step Value* en vergeet niet *Step It* op *Yes* te zetten. Klik op *OK* en vervolgens op de knop *Run* (dat is die met de groene pijl of driehoek; of druk op F2) in het venster AC Analysis om de grafiek weer te geven als functie van de weerstandswaarde (figuur 5).

In dit voorbeeld zijn de stappen even groot (lineair), maar je kunt ook exponentieel stappen. Het is mogelijk om door meerdere componentwaarden tegelijk of in geneste sweeps te stappen. Je kunt ook door de modelwaarden van componenten stappen, bijvoorbeeld de versterkingsfactor van een transistor.

Transiëntanalyse

Je moet de juiste analysemodus kiezen om niet-lineair gedrag te zien (zie het kader **Soorten analyse**). Om niet-lineair gedrag te demonstreren, gebruiken we een simpel vervormingseffect: een diodeclipper zoals in figuur 6. We kunnen dan transiëntanalyse gebruiken om vervorming te zien alsof we een oscilloscoop gebruiken.

Stel de frequentie van de sinusbron, V1, in op 1 kHz (in het vak 'F' rechtsonder in het eigenschappen-venster) en kies *Probe Transient...* uit het menu *Analysis*. Kies in het *Probe*-menu *Limits...* en stel *Maximum Run Time* in op 2m en *Maximum Time Step* op 2u.

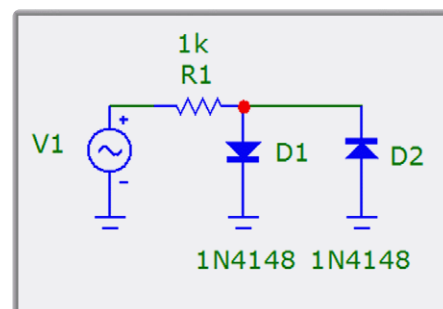
Verschillende analyses

Na het tekenen van de schakeling wil je gaan meten. Hiervoor moet je een analysemodus kiezen. In SPICE-taal heet meten met een oscilloscoop 'transiëntanalyse', terwijl meten met een spectrumanalyzer 'AC-analyse' wordt genoemd. De verbindingpunten van de componenten heten knooppunten. In de analysemodus kun je de spanningen op deze knooppunten en de stromen erdoorheen meten.

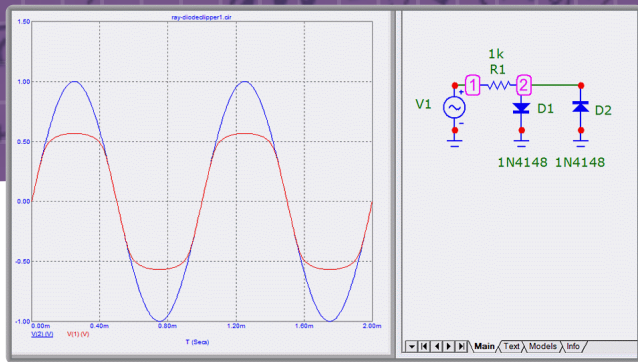
Voor het visualiseren van niet-lineair gedrag (zoals vervorming en clipping) moet je de transiëntanalyse gebruiken. De AC-analyse gaat altijd uit van lineair gedrag en geeft de kleinsignaal-frequentierespons van schakelingen zoals filters en versterkers.

In beide analysemodi kun je ook de DC-spanningen en -stromen zien. Er zijn nog meer modi mogelijk, zoals ruis- en impedantieanalyse.

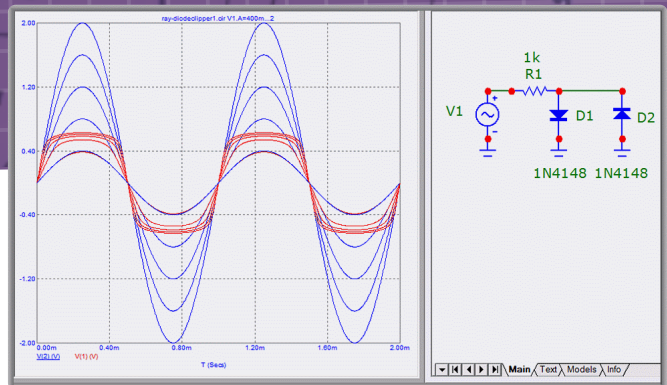
Wanneer de schakeling correct is getekend (zonder 'zwevende' knooppunten) wordt een analysetype geselecteerd. Vervolgens wordt een berekening uitgevoerd over een door de gebruiker gedefinieerde periode of frequentiebereik met een geselecteerde resolutie. Het instellen van deze resolutie is een afweging tussen de gladheid van de curve en de rekentijd. Als de berekening klaar is, kun je in het circuit gaan 'meten'.



Figuur 6. Deze eenvoudige schakeling vertoont niet-lineair gedrag.



Figuur 7. Een transientanalyse van de schakeling van figuur 6 levert deze signalen op.



Figuur 8. De uitgangsverzadiging neemt geleidelijk toe naarmate de amplitude van het ingangssignaal toeneemt.

Het is een goede gewoonte om de stapgrootte in te stellen op 1/1000 van de looptijd. Meet nu weer in de schakeling, zowel aan de ingang (de sinus), als aan de uitgang (de afgeknotte golfvorm).

Amplitude-sweep

Zoals eerder uitgelegd, kun je door een reeks componentwaarden of modelparameters stappen. Laten we dat eens doen met de amplitude van de sinusbron. Kies *Stepping...* uit het *Probe*-menu. Kies de V1-amplitude 'A' en ga van 400m naar 2V in stapjes van 400 mV (vergeet niet *Step It* op Yes te zetten).

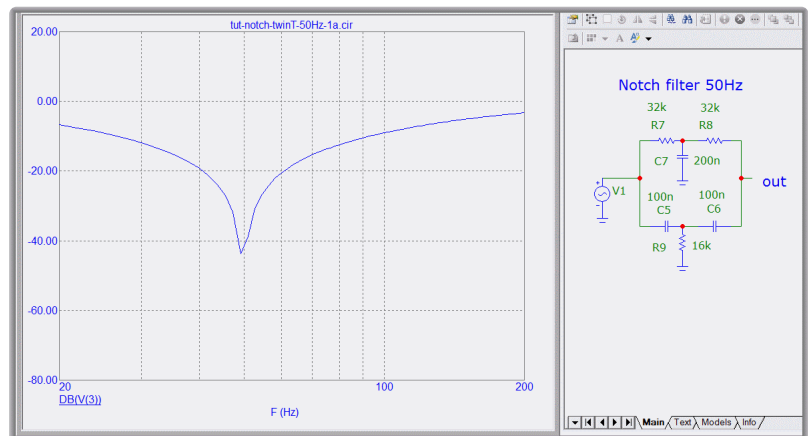
Figuur 8 toont de resultaten.

Aangezien de schakeling van **figuur 6** bedoeld is voor een geluidseffect, zou het nuttig zijn om te horen hoe het klinkt. Micro-Cap biedt de mogelijkheid de golfvorm af te spelen via je geluidskaart of op te slaan als WAV- of CSV-bestand.

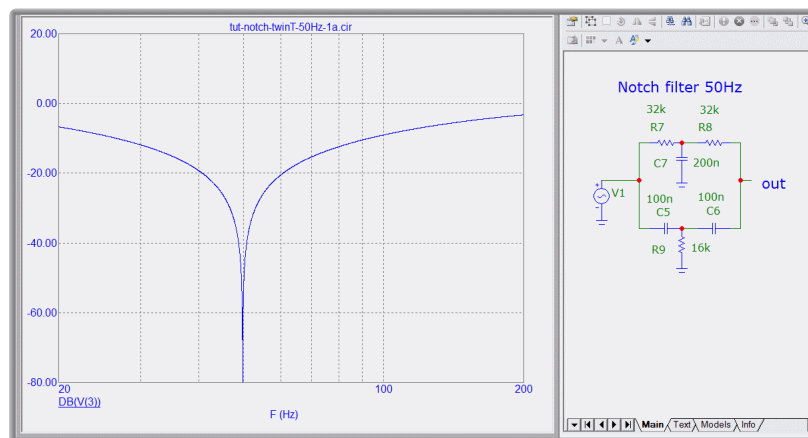
De duur van het geluid wordt bepaald door de probe-grenzen. Verander *Maximum Run Time* in 500m (en *Maximum Time Step* in 50u) voor een halve seconde geluid. Dubbelklik vervolgens op het trace-venster om de eigenschappen ervan te openen en selecteer het tabblad *Save Curves*. Selecteer de golf die je wilt horen in de *Curves*-lijst. Indien je stepping hebt ingeschakeld (zoals het stapsgewijs veranderen van de amplitude van het ingangssignaal), kun je elke stap beluisteren door deze te selecteren in het vak *What To Save* en vervolgens op *Play* te drukken.

Waar zijn de componenten?

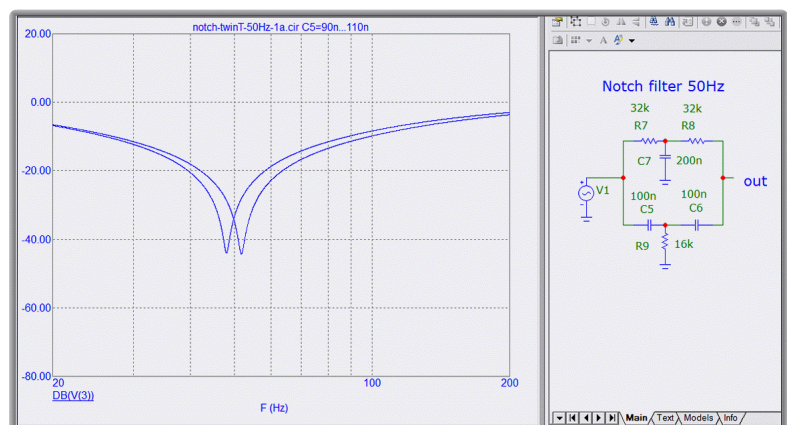
Alle componenten zijn te vinden via het tabblad Components en in de uitklapbare bibliotheeklijst (het 'Panel'), maar er zijn ook enkele sneltoetsen. Bovenaan het scherm is de componentenbalk beschikbaar, maar nog sneller zijn toetsen als 'R' voor een weerstand en 'C' voor een condensator. Bovendien slaat het programma de recent gebruikte componenten op in het startvenster van het tabblad *Components*.



Figuur 9. De simulatieresolutie is van belang. Hier is *Probe Limits* ingesteld op 100 punten.



Figuur 10. Dezelfde simulatie als in figuur 9, maar nu met *Probe Limits* ingesteld op 10.000 punten.



Figuur 11. Dezelfde schakeling als in figuur 9, maar nu is C5 niet identiek aan C6.

Resolutie van de simulatie

Verkeerde resolutie-instellingen kunnen details in het resultaat van een simulatie beïnvloeden of zelfs onzichtbaar maken. Een notchfilter heeft bijvoorbeeld een scherpe dip bij de frequentie waarvoor het bedoeld is. Bij een te geringe frequentieresolutie lijkt de dip minder diep dan hij in werkelijkheid is. **Figuur 9** en **figuur 10** tonen de resultaten van hetzelfde twin-T notchfilter, dat tweemaal is gesimuleerd met verschillende resolutie-instellingen.

Ideale componenten

Dit filter heeft met de gegeven onderdelenwaarden een oneindig diepe dip (notch) bij 50 Hz. Maar voordat je dit 'perfecte' filter bouwt, moet je even nadenken over de componentwaarden. In een simulator zullen de twee condensatoren van 100 nF zowel identiek als exact 100 nF zijn, en krijg je een oneindig diep 50 Hz notchfilter zoals hier getoond.

Verandering van de waarde van bijvoorbeeld C5 met plus of min 10% heeft een grote invloed (**figuur 11**). De dip is nu slechts 40 dB diep en het filter is bovendien ontstemd, wat resulteert in slechts 35 dB damping bij 50 Hz. Dit laat zien hoe een simulator je kan helpen te voorspellen hoe de toleranties van componenten in de praktijk uitpakken in je schakeling – voordat je die opbouwt.

Voor nog realistischer simulaties moet je daarnaast rekening houden met andere parasitaire parameters, zoals de lengte van aansluitdraden en printsporen (zie het kader).

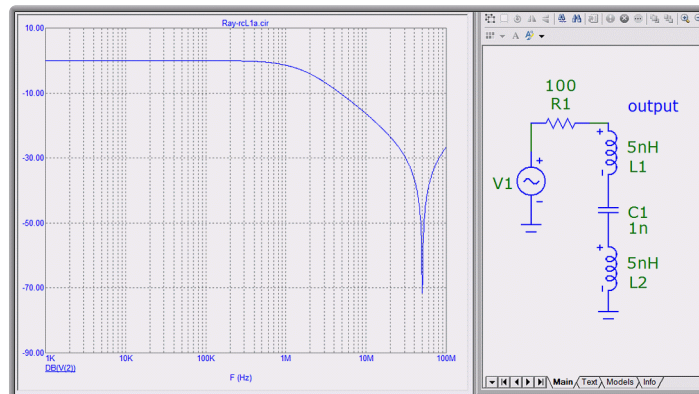
Hiermee houdt het nog lang niet op

Dit artikel heeft slechts een tipje opgelicht van de sluier die over deze complexe materie ligt. Zoals al opgemerkt, moet een simulator deel uitmaken van je gereedschapskist, net als een multimeter en een oscilloscoop. Houd echter altijd in gedachten dat een simulator een vereenvoudigde versie van de werkelijkheid toont. Daarom moet je voor correcte resultaten met een simulator (Micro-Cap of welke andere dan ook) enig idee hebben van de praktische aspecten van het bouwen van een schakeling. Weten hoe de simulator moet worden ingesteld en wat de beperkingen ervan zijn, is een eerste vereiste. Simulatie combineren met het bouwen van een echt prototype is nog steeds een goed idee.

Beperkingen van componentmodellen

Een simulatie is slechts zo goed als de modellen die worden gebruikt. Alle componenten in ons filter zijn ideaal. In de praktijk is dat natuurlijk niet het geval. Voor ons eenvoudige laagdoorlaatfilter is de belangrijkste beperking de serie-inductie van de condensator aansluitingen. Elke millimeter draad voegt een inductie van ongeveer 1 nH toe, waardoor de impedantie van de condensator boven een bepaalde frequentie gaat toenemen en het filtereffect afneemt.

Laten we aannemen dat je condensator aansluitingen van 5 mm heeft, wat we simuleren door twee spoelen van 5 nH in serie met de condensator aansluitingen op te nemen (wat hetzelfde is als het toevoegen van één serie-inductie van 10 nH).



We zien dat het filter een scherpe dip heeft rond 50 MHz en dan vanaf 50 MHz begint te 'leken'. Dit wordt veroorzaakt door de resonante LC-schakeling. Als je RF-storingen tot 1 GHz wilt filteren is dit een probleem, maar in speciale gevallen kun je gebruik maken van dit effect. Als je bijvoorbeeld een bemonsterings-klokfrequentie bij 50 MHz wilt filteren, dan is dit een verbetering, maar moet je wel een beetje met de waarde van de inductie 'spelen'.

Het bovenstaande is een voorbeeld van hoe een simulator je kan helpen een schakeling op de juiste manier op te bouwen.

Vraag: als draden inductie toevoegen, levert het gebruik van SMD-condensatoren dan een filter zonder parasitaire inductie op? Nee, maar het komt in de buurt. De condensator heeft nog steeds een eindige lengte (2 mm is 2 nH) en zijn printspoor naar massa voegt ook zelfinductie toe. Via's kunnen 0,3...1 nH toevoegen, afhankelijk van hoe je ze definieert en plaatst.

Gooi je breadboard met zijn slechte contacten dus nog niet weg (hoe modelleren je die eigenlijk?).

220336-03

Vragen of opmerkingen?

Hebt u technische vragen of opmerkingen naar aanleiding van dit artikel? Stuur een e-mail naar de auteur via rs.elc.projects@gmail.com of naar de redactie van Elektor via redactie@elektor.com.



Gerelateerde producten

> Joy-IT ScopeMega50 USB Oscilloscope (SKU 18277)
www.elektor.nl/18277

> Gilles Brocard, *The LTspice XVII Simulator* (SKU 19741)
www.elektor.nl/19741

WEB LINK

[1] Micro-Cap website: <https://www.spectrum-soft.com/download/download.shtm>