

Digitaal naar analoog converters

Inleiding

De microcomputer werkt geheel digitaal. Maar in de wereld om ons heen werkt er veel analoog. Om van de digitale wereld in de computer naar de analoge echte wereld te gaan hebben we een digitaal naar analoog converter nodig. Deze vertaalt een digitaal getal op een uitgangspoort van de microcomputer naar een overeenkomstige elektrische spanning of stroom.

Typen

Digitaal naar analoog conversie kun je op diverse manieren bereiken:

1. een speciaal DAC-IC, bijv. de DAC0808 (weinig componenten, geen afregeling, maar kost wat meer), of
2. een weerstandsnetwerk met weerstanden in de verhouding R, 2R, 4R, 8R enz. (eenvoudig), of
3. een weerstandsladder met waarden R en 2R (iets complexer, maar ook iets nauwkeuriger), of
4. dutycycle modulatie in software van een uitgangsbijt (het goedkoopst, maar traag).

Wij zullen ze alle vier behandelen en nabouwbare voorbeelden geven.

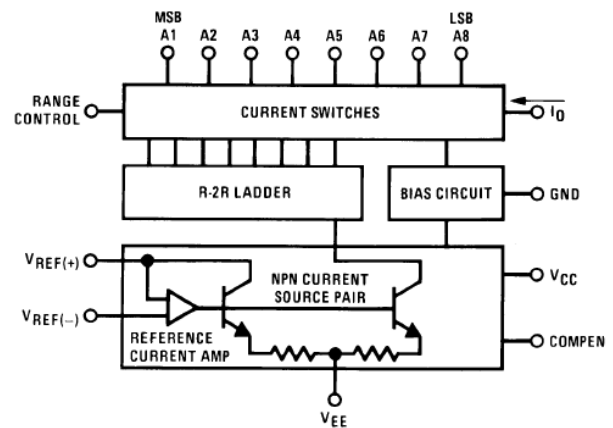
Met het IC DAC0808

Inwendig bestaat het IC uit een (instelbare) stroombron (NPN CURRENT SOURCE PAIR), die een stroom van zeg 2 mA trekt uit het R-2R ladder netwerk. Die stroom gaat naar V_{EE} , een (negatieve) spanning van -15 V. Het R-2R netwerk verdeelt die stroom van 2 mA netjes in stromen van 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$, mA.

Acht elektronische stroomschakelaars (= transistoren) halen die stromen of uit de nul (GND), of uit de uitgang I_O . Uitgang I_O moet ook op nul volt gehouden worden en er loopt dan een stroom in de richting van de pijl.

De schakelaars worden bediend door de bits A1 t/m A8. Daardoor wordt de stroom I_O evenredig met de waarde van het binaire getal op A1 A8.

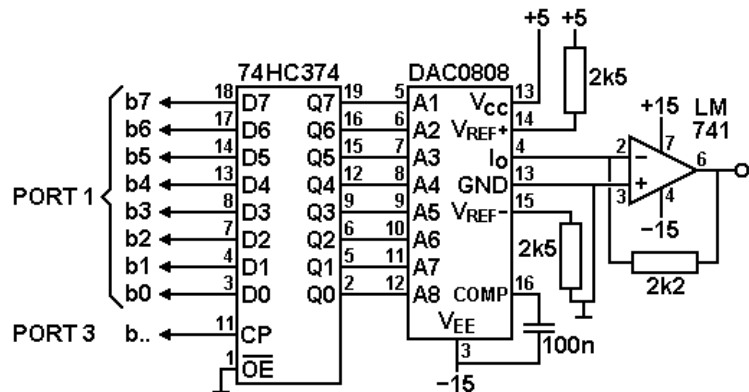
Merk op dat A1 het meest waardige bit is (MSB, Most Significant Bit) en A8 het minst waardige (LSB, Least Significant Bit). Dit is precies andersom dan we normaal doen, b7 = MSB b0 = LSB. Om de één of andere reden zien we dit vaker, juist bij DAC's en ADC's. Wees op je hoede als je bits genummerd ziet van 1 t/m 8 in plaats van 7 t/m 0. Kijk ook eens in de DAC0808-documentatie van Analog Devices.



Aansluitschema

Het schema begint met een register, waarin door het programma een 8-bits getal gezet wordt. Dit register is een IC 74HC374 of 74HCT374 en bestaat uit 8 D-flipflops. Het neemt het bitpatroon dat op poort P1 staat over op het moment dat de klok-ingang CP vanuit poort P3 even laag en weer hoog gemaakt wordt. Daarna is P1 weer vrij voor andere acties. Op de uitgangen Q7 t/m Q0 is nu het getal als binaire code van 0 en 1 continu beschikbaar. Dit binaire getal zet de schakelaars A1 t/m A8 in de juiste stand.

Merk op dat A1 (MSB) aan b7 (MSB) zit en A8 (LSB) aan b0 (LSB). Zo moet het dus, raar maar waar. De referentiestroom van 2 mA wordt ingesteld op V_{REF+} , pin 14. De weerstand van 2k5 maakt vanuit de +5 keurig een stroom van 2 mA. Je mag hier ook 2k4 of 2k7 in zetten, maar wil je het precies goed doen: 2k5 maak je met 1k5 en 1k in serie.



De uitgang en het spanningsbereik

De opamp LM741 zet de stroom van 0....-2 mA om in een spanning van 0....+4,4 V. De spanning op de min-ingang blijft keurig 0 volt. Virtueel is dit dus aarde, zie voor meer uitleg op de volgende pagina. Wil je geen 4,4 volt maar wat anders, verander dan de waarde van de weerstand van 2k2. De maximale uitgangsspanning, dat is dus voor het getal 1111 1111, is 2 (mA) x de weerstandswaarde (kΩ). Maar let op, de opamp trekt het niet veel hoger dan een volt of 12.

Nadeel van deze schakeling is dat je een negatieve en positieve voedingsspanning van 15 volt nodig hebt. Voordeel is dat de stapjes mooi even groot zijn, zodat je geen compensatie hoeft te doen (zie verderop).

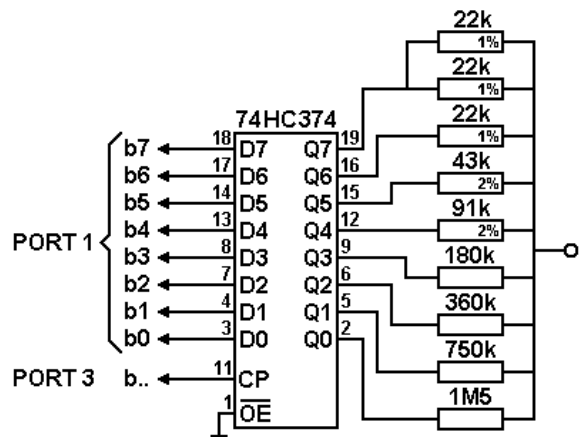
Weerstandsnetwork 1-2-4-8

Met weerstanden met waarden in de verhouding 1:2:4:8.... is met weinig moeite zelf een DA-converter te maken. Het schema begint met een register, waarin door het programma een 8-bits getal gezet wordt. Dit werkt net zoals bij de schakeling met de DAC0808.

Nauwkeurigheden en toleranties

De weerstanden hebben als waarde: 11k, 22k, 44k, 88k tot 1M5 toe. De werkelijke waarden wijken iets af, maar binnen bepaalde grenzen is dat wel toelaatbaar. Naarmate de weerstandswaarde laagohmiger is moet de nauwkeurigheid groter zijn. Als wij een afwijking van de helft van het minst waardige bit (een half stapje) toestaan dan mag de weerstand van 1M5 een afwijking van 50% hebben. Iedere

weerstand een trapje lager in waarde, dus een plaatsje hoger in het schema, mag dan de helft van de afwijking hebben. Zo doortellend mag dan de weerstand helemaal bovenaan slechts een afwijking van 0,5% hebben. Daarom zijn daar twee weerstanden van 1% parallel geschakeld. Dit is een van de weinige elektronische schakelingen waarbij nauwkeurige weerstanden echt belangrijk zijn. Met een testprogramma (op de volgende pagina) en wat experimenteren kun je het goed genoeg krijgen.

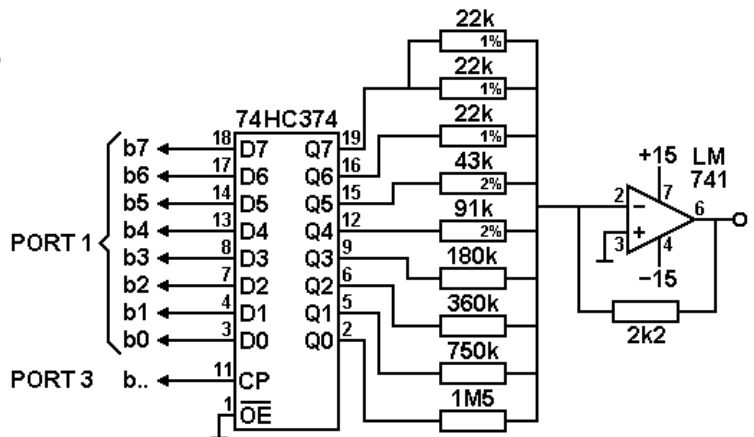


Een virtueel aardpunt

Het beste werkt dit netwerk als de uitgang op aardpotentiaal gehouden wordt. Maar dan is er geen spanning meer zul je zeggen. Dat klopt, maar het gaat dan ook om de stroom die er uit het netwerk komt. Elke weerstand levert een stroom naar het verzamelpunt toe als zijn Q één is. De stroom is evenredig aan de weerstandswaarde. Dat is nou juist het werkingsprincipe van de DAC.

Met een opamp (operational amplifier) is die stroom weer om te zetten in een spanning. De LM741 houdt via de weerstand van 2k2 de -ingang op hetzelfde potentiaal als de +ingang, en dus op aardpotentiaal.

Omdat de stroom uit de weerstanden nu naar de opamp toe gericht is, geeft de uitgang een negatiefgaand signaal af. In deze schakeling loopt de uitgangsspanning van 0 volt voor binair getal 0000 0000, naar -2 volt voor 1111 1111. Dat komt omdat het netwerk een positieve stroom afgeeft richting de opamp. Het is precies omgekeerd als bij de DAC0808. Bovendien hebben we weer plus en min 15 volt nodig voor de LM741.

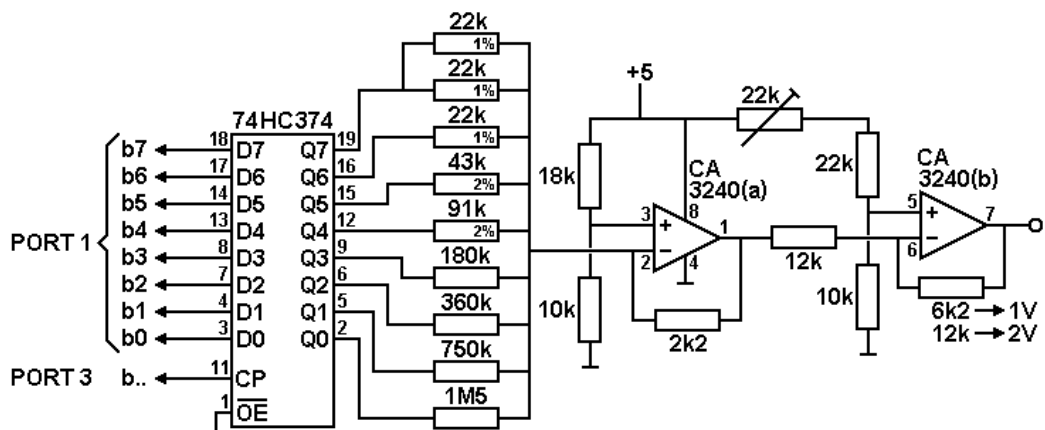


Dubbele opamp

Het is niet echt nodig dat het knooppunt van de weerstanden op aardpotentiaal gehouden wordt. Het is ook goed als het op een vaste spanning gehouden wordt, bijv. op 1,5 volt. Dan levert de Q een stroom als hij 1 is en hij trekt

er een weg als hij 0 is. Als we de + ingang van de opamp op 1,5 volt zetten gebeurt dat.

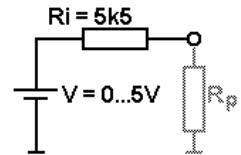
De opamp keert dan nog steeds de polariteit om. Meestal wil je dat niet. Met een tweede opamp, er kunnen er twee in een 8-pennig IC-tje zitten, keer je dat weer om. Met de weerstandswaarde onder de tweede opamp kun je bovendien het verschil in spanning tussen 0000 0000 en 1111 1111 instellen en met de instelweerstand van 22k kun je de spanning voor 0000 0000 netjes instellen op 0 volt. Deze opamp CA3240 werkt nog goed op een voedingsspanning van 5 volt. Dat is gemakkelijk, want die hadden we toch al.



Zonder opamps

Maar zou het niet helemaal zonder opamps kunnen? Nou, als je niet de allerhoogste eisen stelt.... Het verzamelpunt van de weerstanden in het eerste schema op de vorige pagina gedraagt zich als een spanningsbron van 0 volt voor het binaire getal 0000 0000 tot +5 volt voor 1111 1111. De inwendige weerstand van deze spanningsbron is 5,5 kilo-ohm. Ja inderdaad, dat is de vervangingswaarde van alle weerstanden parallel.

Zetten we op de uitgang een weerstand R_p naar aarde, dan daalt de uitgangsspanning als gevolg van de inwendige weerstand. Met een R_p van 1k5 loopt de uitgangsspanning nog van 0 tot ongeveer 1 volt. Zo zijn heel gemakkelijk lagere spanningsbereiken in te stellen. In de schema's met de opamp is R_p dus nul ohm gemaakt, de z.g. virtuele aarde.



Testprogramma voor de DAC

Nu we het toch over inwendige weerstanden hebben, de uitgangen Q0 t/m Q7 van het register 74HC374 hebben ook een zekere inwendige weerstand. Die had eigenlijk verrekend moeten zijn in de waarde van de weerstanden. We komen deze onnauwkeurigheid tegen als we een trapjesgolfvorm gaan maken door oplopende getallen naar de DAC te sturen.

Daartoe maken we even het volgende DAC-testprogramma voor de 8051:

```
*****  
;***                                     ***  
;***      Zaagtandspanning voor DAC-test      ***  
;***                                     ***  
;*****  
  
      ORG 0          ;Begin het programma op nul.  
  
P1      EQU 90H      ;Poort 1 (D-ingangen)  
P3      EQU 0B0H     ;Poort 3 (voor de klokpuls)  
CP      EQU 0        ;bit 0 is voor de klokpuls CP  
  
begin   MOV A,R0      ;R0 wordt de oplopende variabele  
        MOV P1,A      ;en stuur dat naar P1.  
        INC A         ;maak A één hoger  
        MOV R0,A      ;en zet dit terug in R0.  
        CLR P3.CP     ;Maak bit CP van P3 even 0  
        SETB P3.CP    ;en maak hem weer 1: Klokpuls.  
        MOV A,#10     ;Beginwaarde voor wachtlus.  
wait    DEC A         ;Wachtlus van A x 3 usec.  
        JNZ wait      ;Terugsprong elke 3 usec.  
        SJMP begin    ;Opnieuw naar het begin.  
  
      END
```

Type dit programma in op de editor en assembleer het. Als er geen fouten optreden programmeer het dan in EPROM (oude versies van de μC) of in het ingebouwde flash memory (nieuwe versies).

Als je het programma laat lopen zie je op het ingebouwde LED-display alle segmenten oplichten op halve sterkte. Verder is er schijnbaar geen activiteit zichtbaar.

Sluit de DAC aan op P1 en bit 0 van P3 en sluit een oscilloscoop aan op de uitgang. Je zult hier een zaagtandspanning zien van 100Hz, 200Hz of 600Hz, afhankelijk van de versie van de μC . Van de zaagtand zie je alleen de schuine flank. De terugslag naar beneden is zo snel dat je die niet ziet. De schuine flank moet mooi strak zijn, zonder haken. Er zijn 256 stapjes, die zijn op de oscilloscoop nauwelijks van elkaar te onderscheiden.

Op de uitgang van de LM741, dat is dus pennetje 6, moet je een naar beneden lopende zaagtand zien, die van 0 volt loopt tot -2 volt. Die 0 V komt overeen met binair 0000 0000 en de -2 V met 1111 1111.

Op de eerste uitgang van de CA 3240, pen 1, moet ook een omlaag lopende zaagtand staan, maar nu vanaf 2,5 volt (0000 0000) tot 0,5 volt (1111 1111). Op de uitgang van de tweede opamp, pennetje 7 staat dan een omhoog lopende zaagtand, die je met de instelpotmeter kunt instellen op 0 V voor 0000 0000. Het eindpunt voor 1111 1111 ligt dan op 1 V ($R = 6k2$), of 2 V ($R = 12k$).

Verbeteren van de lineariteit door experimenteren

Met de regelaars van de oscilloscoop kun je delen van de opgaande flank uitvergroten. Het meest kritische punt is het midden, waar de getallenreeks over gaat van 0111 1111 naar 1000 0000. De (on)nauwkeurigheid van de twee parallelle weerstanden van 22k aan b7 en de onbekende inwendige weerstand van uitgang b7 komt hier tot uiting. Evenzo is de (on)nauwkeurigheid van de weerstand van 22k aan b6 op een kwart en op driekwart van de flank te zien.

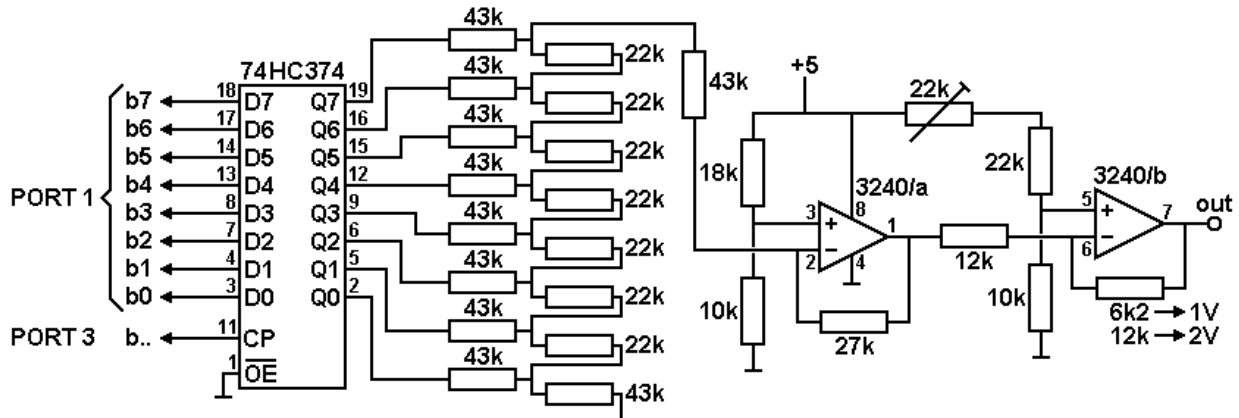
Je ziet dan een wat hogere of wat lagere "trede" in het trapje. Als dat minder is dan de hoogte van een halve trede is dat heel acceptabel. Maar is het duidelijk meer, of wat erger is, een stapje terug naar omlaag, dan zou je er iets aan moeten doen.

Was de trede te laag of zelfs negatief, dan kun je de weerstand een beetje in waarde verlagen door er een hoogohmige weerstand parallel aan te zetten. Zo kun je een haken in de zaagtand compenseren. Het beste gaat dit door domweg te proberen terwijl je op de oscilloscoop kijkt naar wat er gebeurt. Begin maar eens met een weerstand van 1M5, dat verhoogt de trede met juist één gemiddelde staphoogte. Als je die er met omgebogen draadjes tegenaan houdt zie je op de oscilloscoop wat er gebeurt. Maar let op! Je hebt een heel duidelijk vinger-effect, die zijn laagohmiger dan deze weerstand. Even met niet afgeknipte draden er overheen solderen en dan pas kijken is verstandiger. Is het resultaat naar wens, dan kun je het netjes maken met op maat geknipte draadjes.

Was de trede te hoog, dan moet de weerstand hoogohmiger worden. Een iets hogere waarde uit de reeks is meestal te veel. Wat dan werkt is een relatief laagohmige weerstand en serie schakelen. Om je een idee te geven: een weerstand van 82 ohm in serie met de 11k van b7 maakt de trede in het midden juist één staphoogte lager. In die omgeving moet je het dus zoeken: honderd(en) ohms.

Weerstandsladder R-2R

Een deel van het probleem met de 1-2-4-8 weerstanden is dat de belasting van het register-IC voor de verschillende bits niet hetzelfde is. Bit b7 wordt belast met 11k en bit b0 met maar 1M5. Daarom is de invloed van de inwendige weerstand van de verschillende uitgangen ook verschillend. Dit wordt opgeheven door alle weerstanden dezelfde waarde te geven in een R-2R netwerk.



De weerstanden R hebben de waarde van 22k en de weerstanden 2R hebben de waarde 43k. Het had eigenlijk 44k moeten zijn, maar het komt toevallig zo uit met de standaardreeks. Bovendien als de inwendige weerstand van de 74HC374 of 74HCT374 ongeveer 1k is klopt het precies. In elk geval komt het meer in de goede richting dan met 1-2-4-8.

Hetzelfde schema met de dubbele opamp CA 3240 is hier gebruikt. Ook hier zie je met het testprogramma op de oscilloscoop een negatief gaande zaagtand op pen 1 van de opamp en een positief gaande zaagtand op pen 7.

Dutycycle modulatie

(moet nog geschreven worden)