

Tentamen Elektronische Schakelingen

Datum: vrijdag 24 augustus 2001

Tijd: 09.00-12.00

Vul in uw naam en studienummer:

Naam:.....
Studienummer:

Cijfer:.....

Dit tentamen is een "open boek" tentamen. Het gebruik van een rekenmachine is toegestaan. Gebruik deze opgavenbladen ook voor het noteren van de antwoorden in de aangegeven ruimtes, maar houdt ze beknopt. Eventueel kunt u extra bladen gebruiken die u dan duidelijk van uw naam moet voorzien.

Prefix reminder: micro = 10^{-6} , nano = 10^{-9} , pico = 10^{-12} , femto = 10^{-15} , atto = 10^{-18}

Hard-disk drives in de huidige computers hebben vergeleken met de drives van bijvoorbeeld 10 jaar geleden een gigantische opslag capaciteit. Toentertijd was een drive met 20 MB opslag groot; tegenwoordig zit er in een nieuwe PC al standaard een drive met 40 GB opslagruimte. Deze toename van opslagcapaciteit heeft direct tot gevolg dat ook de snelheid van de informatiestroom van en naar de hard-disk sterk is toegenomen. De elektronica in huidige drives moet snelheden tot wel 500 Mb/s aan kunnen. Om dit te kunnen realiseren bevat een hard-disk drive een stukje hoogwaardige elektronica. Een blokschema met de essentiële functies van een leeskanaal (read channel) van een hard-disk drive is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: blokschema van een leeskanaal van een hard-disk drive

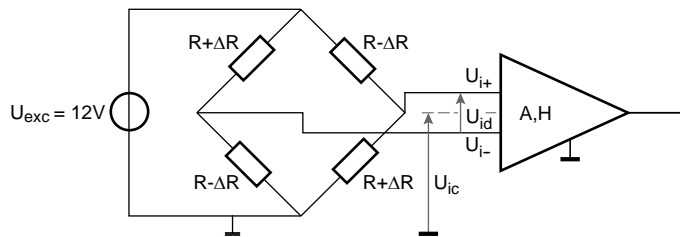
Aan het begin van het leeskanaal bevindt zich een sensor die het magnetische signaal van de hard disk omzet in een elektrisch signaal. Het verkregen signaal is nog zwak en zal daartoe eerst versterkt moeten worden voordat de verdere processing plaats kan vinden. Het signaal na versterking is in principe een analogoog signaal en ziet er uit als "slechte" pulsen. Dit signaal zal door middel van signaalbewerking weer omgezet moeten worden naar een net pulsvormig signaal. Kern hierin is om te beslissen wat de "nullen" en wat de "enen" zijn. Dit kan in principe door met een eenvoudige comparator te beslissen of het signaal boven of onder een bepaald niveau zit. Echter, de kwaliteit van het signaal afkomstig van de versterker is zodanig dat deze oplossing te veel fouten zou veroorzaken. Een nauwkeurigere manier van beslissen of het om een 1 of een 0 gaat is door het signaal om te zetten via een AD omzetter naar een 6-bits digitaal signaal. Op basis van dit 6-bits signaal kan dan met digitale signaalprocessing nauwkeurig beslist worden of het om een 1 of 0 gaat.

Natuurlijk moet er voor de AD conversie filtering plaatsvinden om onder andere hoogfrequente storing te onderdrukken zodat deze de AD omzetting niet nadelig kunnen beïnvloeden.

Dit tentamen zal inzoomen op verschillende aspecten van dit leeskanaal van een hard-disk drive.

1. Sensor (12 punten)

Een sensor voor het meten van druk kan bijvoorbeeld opgebouwd worden met een brug van Wheatstone (zie Figuur 2) en is samengesteld uit een Wheatstone brug. In de figuur is ook een versterker weergegeven als buffer. De weerstanden R_1 tot en met R_4 veranderen met de mechanische belasting van de constructie waarop deze zijn bevestigd. De plaatsing van de rekstrookjes is zodanig dat R_1 en R_3 toenemen met mechanische belasting ($R_1 = R_3 = R_0 + \Delta R$) en R_2 en R_4 in precies dezelfde mate afnemen ($R_2 = R_4 = R_0 - \Delta R$). De nominale weerstand bedraagt $R_0 = 1 \text{ k}\Omega$ en een weerstandverandering $\Delta R = 10 \text{ m}\Omega (= 10^{-2} \Omega)$ dient met een onnauwkeurigheid van 10% gedetecteerd te worden; $(\Delta R/R)_{\min} = 10^{-5}$ bij $\varepsilon = 10\%$. De DC excitatiespanning $U_{\text{exc}} = 12 \text{ V}$.



Figuur 2: Wheatstone brug als sensor voor druk

1.1 Bereken uit de specificaties de detectiegrens, $(\Delta R/R)_{\text{det}}$.

1.2 De Wheatstone brug met excitatiespanning kan vanuit de differentiële uitgang beschouwd worden als een signaalbron met bronweerstand. Toon aan dat de bronweerstand beschreven kan worden door: $R_g = R_0$ en bepaal de uitdrukking voor de signaalbron U_g .

1.3 Bereken het spectrale ruisvermogen van de bronweerstand ($4kT = 1,65 \cdot 10^{-20} \text{ J}$).

1.4 Veronderstel dat de ruisspanning van de bronweerstand gelijk is aan: $u_{\text{ng}} = 60 \text{ nV}$ (dit is niet het juiste antwoord op de vorige vraag). Wordt wat ruis betreft voldaan aan de specificaties? Verklaar uw antwoord.

1.5 Veronderstel $(\Delta R/R)_{\text{max}} = 0,05$ en de resolutie moet tweemaal zo goed zijn als de gespecificeerde onnauwkeurigheid. Bepaal hiermee de benodigde resolutie en het dynamisch bereik van de uitlezing.

1.6 Bepaal de benodigde common-mode rejectiefactor (CMRR=H) van de uitleesversterker bij gegeven $(\Delta R/R)_{\text{min}}$ en onnauwkeurigheidsspecificatie $\varepsilon = 10$.

2. Versterker (14 punten)

De hierboven beschreven magnetische sensor levert een stroom welke nog te zwak is voor verdere bewerking door de analoog-digitaal-omzetter en dient dus op een hoger energetisch niveau gebracht te worden door een versterker. Teneinde de sensorwerking niet te beïnvloeden dient deze versterker een ingangsimpedantie van nul te bezitten. Het filter wordt bij voorkeur aangestuurd vanuit een spanningsdoos met een zo klein mogelijke bronimpedantie. Met deze twee eisen ligt dus vast dat de versterker een *transimpedantieversterker* moet zijn

Ontwerp met behulp van één of meer operationele versterkers een transimpedantieversterker met

- een ingangsimpedantie gelijk aan nul;
- een uitgangsimpedantie gelijk aan nul;
- een overdracht $u_{out} = R \cdot (i_{i+} - i_{i-})$, met R (de transimpedantie, in dit geval een *transresistentie*, dus een *reële* overdracht met dimensie *ohm*) zodanig dat u_{out} varieert **tussen 0 en 2 volt**.

De operationele versterker(s) mag/mogen ideaal verondersteld worden. Geef ook de waarde van R aan.

Stel vervolgens dat de versterker (zoals weergegeven in figuur 2) een offsetspanning heeft van $U_{os,v} = 500 \mu V$ en een offsetstroom van $I_{bias,v} = 50 nA$

2.1 Bereken de equivalente offsetspanning aan de ingang van de versterker: U_{og} .

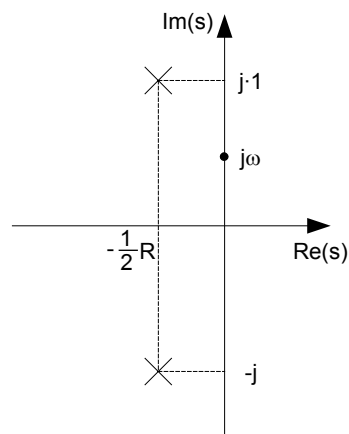
2.2 Veronderstel $U_{og} = 1 mV$ (dit is niet het juiste antwoord op de vorige vraag). Wordt in dit geval, wat de offset betreft, voldaan aan de specificaties? Verklaar uw antwoord.

3. Filter (26 punten)

Het op de versterker aangesloten filter is een laagdoorlaatfilter en dient om te voorkomen dat ten gevolge van de bemonstering hoogfrequente storingen op het sensorsignaal teruggevouwen (Engels: aliasing) worden naar de basisband. Met andere woorden, het laagdoorlatende filter maakt een eenduidige afbeelding van het analogeingangssignaal van de A/D omzetter op het digitale uitgangssignaal van de A/D omzetter mogelijk.

- 3.1 welke afsnijfrequentie mag het filter maximaal hebben, ervan uitgaande dat
- de bemonsterfrequentie van de A/D omzetter 600 MHz bedraagt;
 - het basisband-sigitaal, afkomstig van de sensor, een frequentiespectrum bestrijkt van 0 Hz tot 250 MHz.

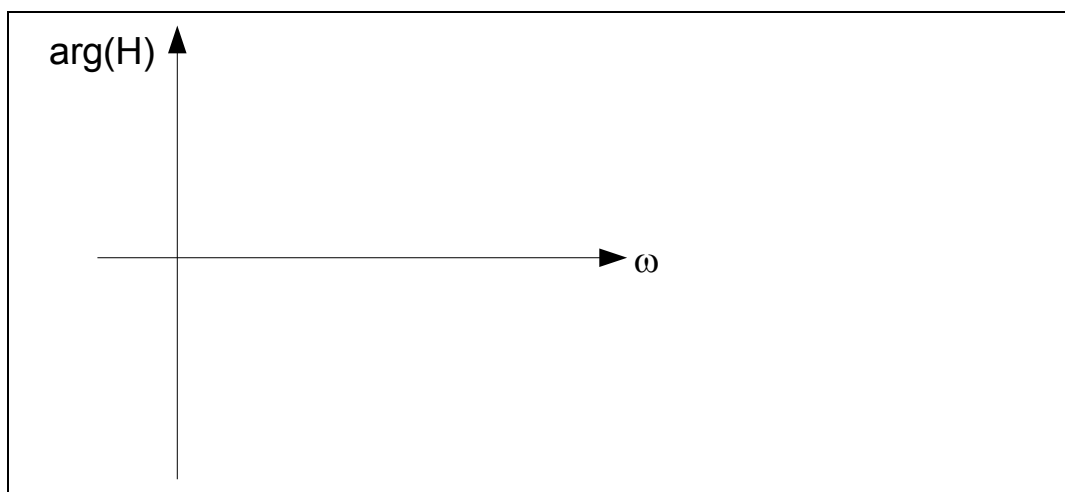
Veronderstel dat het (genormaliseerde) polen-nulpunten-diagram van bovengenoemd laagdoorlaatfilter is zoals weergegeven in Figuur 3.



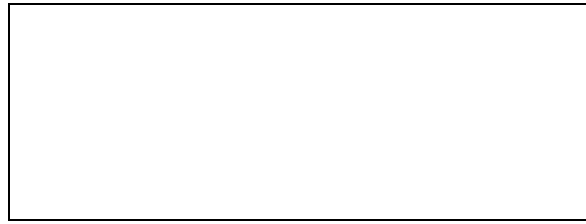
Figuur 3: Verondersteld (genormaliseerd) pool-nulpunten-diagram met $R \leq 2\Omega$

- 3.2 Teken de poolwijzers A_1 en A_2 in figuur 3. Bepaal vervolgens het argument van de overdrachtsfunctie $H(s)$ met behulp van deze wijzers voor $s = j\omega$.

- 3.3 Schets met behulp van de gevonden uitdrukking onder vraag 3.2 de fase karakteristiek $\arg[H(s)]$. Geef de relevante waarden duidelijk aan.



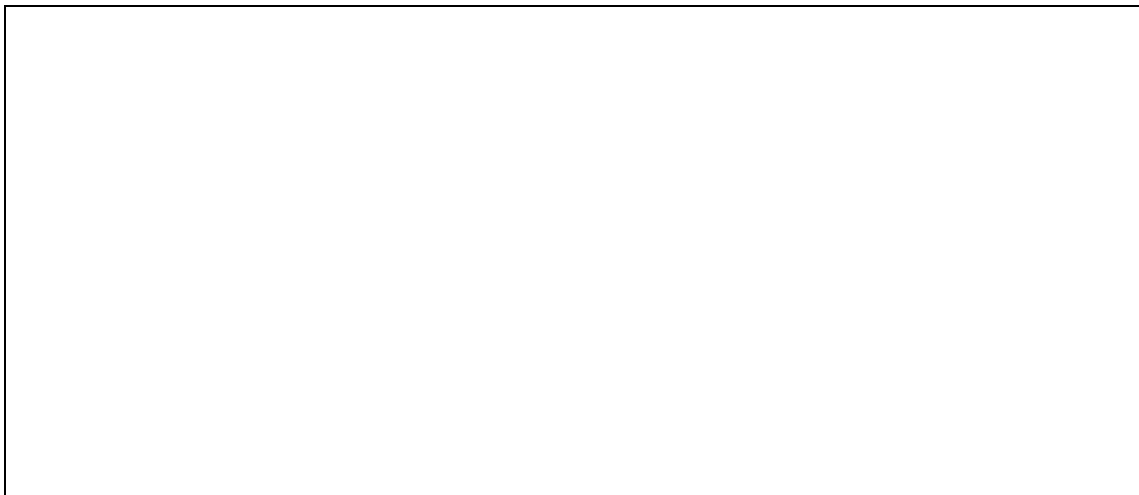
3.4 Wat gebeurt er met het fase verloop bij afnemende waarden van weerstand R? Geef dit eveneens aan in de grafiek van vraag 3.3.



3.5 Ontwerp een spanningsoverdragend laagdoorlatend filter waarbij de *genormaliseerde* ligging van de polen is als geschetst in Figuur 3 met $R=2 \Omega$ (polen hebben dus een gelijk imaginair en reëel deel) en tevens geldt

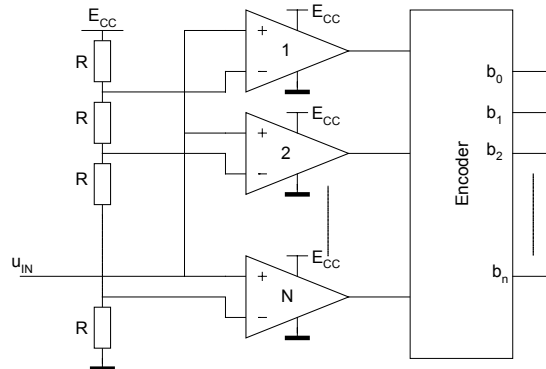
- dat de kantelfrequentie (afsnijfrequentie) f_C (in Hz) gelijk is aan 200 MHz;
- de absolute waarde van deingangsimpedantie, $|Z_i|$, groter is dan 50 ohm voor alle frequenties tussen 0 en 200 MHz.

NB: Vergeet niet dat de uitgangsimpedantie van de bij opgave 2.1 ontworpen transimpedantieverstker gelijk is aan nul.



4.AD conversie (19 punten)

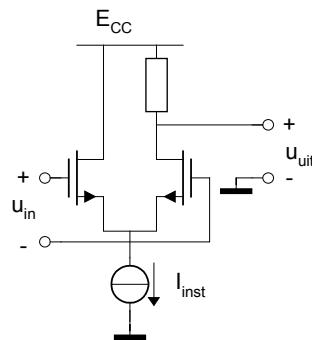
De analoog-digitaal-omzetter wordt ontworpen volgens het “flash” (Nederlands: flits) principe: in één stap, binnen één klokperiode, wordt de omzetting in het binair gecodeerde digitale domein gemaakt. Het principe van een dergelijke A/D omzetter is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4: Principeschema flash AD omzetter

Duidelijk herkenbaar zijn een weerstandsladder (R, R, R, \dots, R) tussen de voedingslijnen (E_{CC} en $0V$) en een grote hoeveelheid (verzadigende) operationele versterkers, waarvan deingangsspanning bestaat uit het verschil tussen een constante spanning afkomstig van de weerstandsladder en deingangsspanning van de A/D omzetter (u_{in}). Ten gevolge van het verzadigen van de operationele versterker zet elke operationele versterker deingangsspanning om in een “0” of een “1” afhankelijk van het teken van de waarde van zijningangsspanning. Iedere operationele versterker werkt hier dus als één-bits A/D omzetter. Door de juiste logische combinatie te maken van alle nullen en éénen kan een meer-bits A/D omzetter gerealiseerd worden.

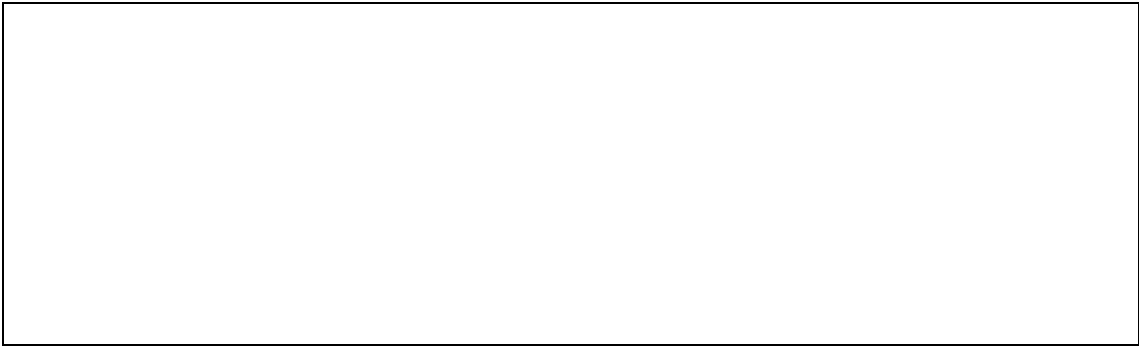
Voor de ingangstrap (het eerste deel) van de verzadigende operationele versterker gebruikt men meestal een “verschilpaar,” een combinatie van twee (gelijke) transistoren, waarvan de NMOS uitvoering is weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5: NMOS verschilpaar

4.1 Schets de spanningsoverdracht $\frac{u_{uit}}{u_{in}}$ van bovenstaand NMOS verschilpaar. Geef duidelijk aan

de waarden van de uitgangsspanning u_{uit} als functie van de instelstroom I_{inst} , de drainweerstand R_D en de voedingspanning E_{CC} voor $u_{in} \ll 0$, $u_{in} = 0$ en $u_{in} \gg 0$.

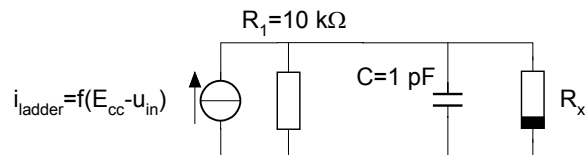


In plaats van de comparator op te bouwen rond een NMOS verschilpaar kan men ook kiezen voor dezelfde schakelingen, maar dan uitgevoerd met bipolaire NPN transistoren.

- 4.2 Welke van de twee verschilparen (NMOS of NPN) kan men het beste gebruiken voor de ingangstrap van operationele versterker 1 (zie Figuur 4)? Betrek in uw antwoord de keuze voor een bepaalde technologie, de ingangsstroom van de transistor en de benodigde spanningszwaai aan de ingang voor overgang van “nul” naar “één” en vice versa.

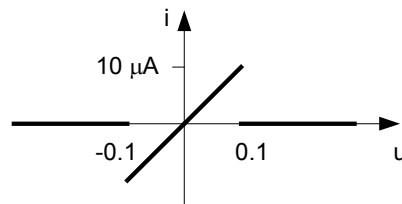


Flash AD omzeters worden daar toegepast waar snelheid een rol speelt. In de volgende vragen gaan we het effect bekijken van een parasitaire capaciteit tussen de weerstandsladder en de opamp op de snelheid. De combinatie weerstandsladder en opamp-ingang kan gemodelleerd worden als weergegeven in figuur 6.



Figuur 6: vervangingschema weerstandsladder en opamp-ingang

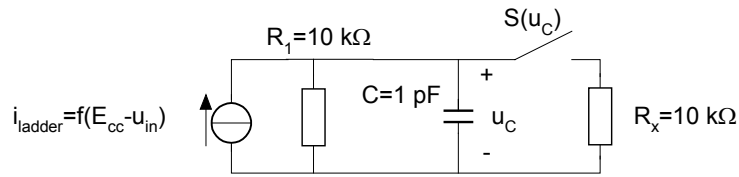
Stroombron i_{ladder} modelleert de uitgangsstroom van de weerstandsladder voor een willekeurige opamp. R_1 is de bijbehorende weerstand (hier $10\text{ k}\Omega$ verondersteld voor één van de opamps). De totale bijbehorende parasitaire capaciteit is 1 pF verondersteld. De ingang van de opamp is gemodelleerd als een niet lineaire weerstand. De u - i karakteristiek is weergegeven in figuur 7.



Figuur 7: u - i karakteristiek van de opamp-ingang

Om in eerste instantie het effect van het schakelen van de opamp duidelijk uit te laten komen is verondersteld dat de gain van de opamp laag is (de opamp bevindt zich in het versterkende gebied wanneer deingangsspanning ligt tussen -0.1 V en $+0.1\text{ V}$. Dit is herkenbaar aan het eindig zijn van de ingangsweerstand).

Het stuksgewijs lineaire circuit van figuur 6 kan vervolgens door het circuit van figuur 8 vervangen worden.



Figuur 8: Vervangingsschema van figuur 7

Hierbij geldt dat schakelaar S open is voor spanningen $u_c < -0.1$ V, gesloten is voor -0.1 V $< u_c < 0.1$ V en weer open is voor $u_c > 0.1$ V.

Gegeven is dat op tijdstip $t=0$ de capaciteitsspanning -1.25 V is en dat de bron i_{ladder} een stap maakt van -12.5 μ A naar 12.5 μ A.

4.3 Bereken hoe lang het systeem er over doet om van $u_c = -1.25$ V naar $u_c = -0.1$ V te komen.

4.4 Bereken vervolgens hoelang het systeem zich bevindt in de toestand -0.1 V $< u_c < 0.1$ V

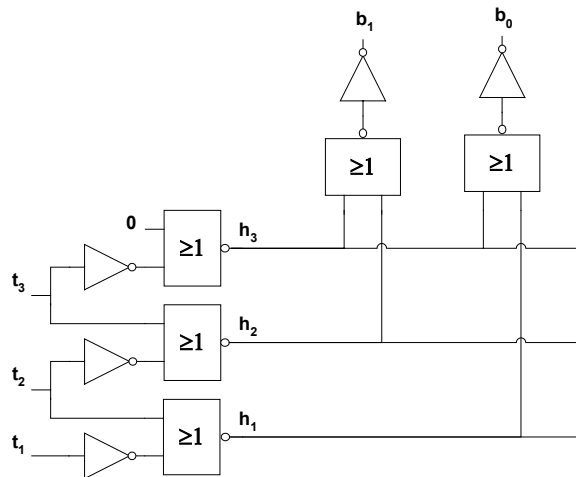
4.5 Bereken tot slot hoelang het systeem er over doet om van $u_c = 0.1$ V naar $u_c = 1.25$ V te komen. Laat kort zien hoe je aan het resultaat komt.

5. Digitale code omzetter (29 punten)

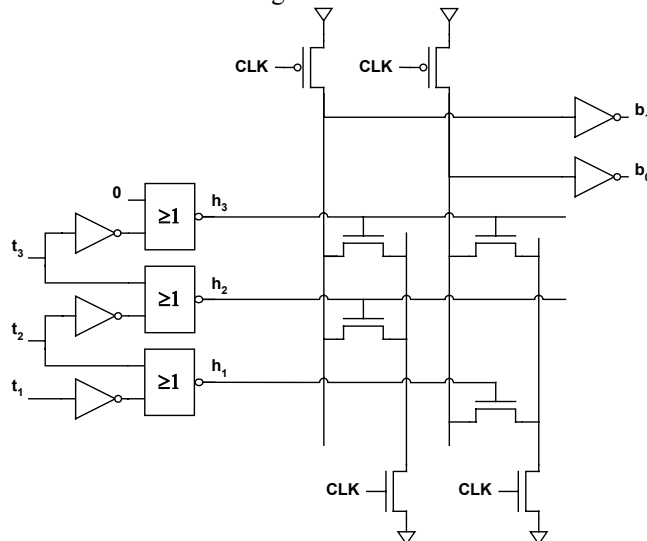
Voor deze vraag moeten de technologie gegevens van de draft 2^e editie van Rabaey gebruikt worden, zoals ook (gedeeltelijk) samengevat op de design-data bladen. De gehanteerde ontwerpregels komen uit de 1^e editie. λ is $0.125 \mu\text{m}$ en V_{DD} is 2.5 V .

Deze vraag zal de encoder (code omzetter) uit figuur 4 behandelen. Neem in het vervolg aan dat de besproken AD-omzetter een 6-bits omzetter is. De encoder logica krijgt als ingangen de $2^6 - 1 = 63$ uitgangen van de verzadigende operationele versterkers en produceert een 6-bits binaire codering van het sensor signaal. Merk op dat de uitgangen van de operationele versterkers een zogenaamde thermometer code afgeven: als bit i hoog is zijn alle “lagere” bits ook hoog. De encoder heet dan ook wel een *thermometer-naar-binair* omzetter. Zo'n omzetter kan elegant gemaakt worden door de thermometer code eerst om te zetten naar een 1-hoog code, waarbij het aantal bits gelijk blijft maar alleen het hoogste aan-bit van de thermometer code aan gezet wordt in de 1-hoog code. Alle andere bits zijn dan laag. Deze 1-hoog code stuurt dan weer een aantal NOR poorten (één per uitgangsbite) die de inverse van de uitgangsbite produceren, 6 invertoren leveren uiteindelijk het binaire signaal $\langle b_5-b_0 \rangle$. Iedere NOR-poort heeft 32 ingangen, omdat van de (6-bits) binaire getallen van 0 t/m 63 er voor iedere bit-positie er steeds 32 met een “0” en 32 met een “1” zijn.

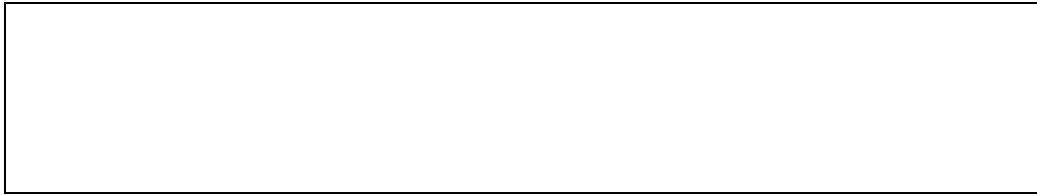
Het principe is hieronder geïllustreerd voor een 2-bits AD omzetter. Hier vormt $\langle t_3-t_1 \rangle$ de thermometer code, $\langle h_3-h_1 \rangle$ de 1-hoog code en $\langle b_1-b_0 \rangle$ het binaire signaal.



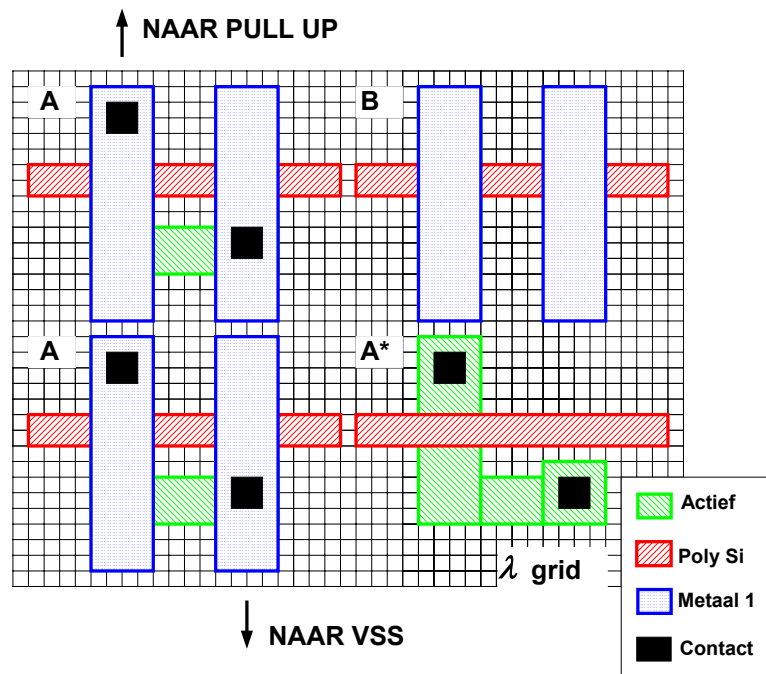
Voor de NOR-poorten die gestuurd worden door $\langle h_3-h_1 \rangle$ zullen we dynamische CMOS poorten gebruiken. Het schema voor 2 bits wordt dan als volgt.



5.1 Waarom verdient deze vorm van logica in dit geval de voorkeur boven statische CMOS logica?



De layout van de NOR-poorten heeft een regelmatige opbouw, het pull-down gedeelte bestaat uit 2 verschillende typen “tegels” zoals gegeven in onderstaande figuur. Tegel *A* is met pull-down transistor, en tegel *B* is zonder pull-down transistor. In de figuur is tegel *A** hetzelfde als tegel *A*, maar het metaal masker is niet getekend om de precieze vorm van het actieve gebied te kunnen bepalen. Het grid is een λ -grid. Natuurlijk horen in de uiteindelijke layout de tegels tegen elkaar geschoven te worden. Iedere rij correspondeert met een bepaalde uitgangswaarde en iedere kolom met een uitgangsbij.



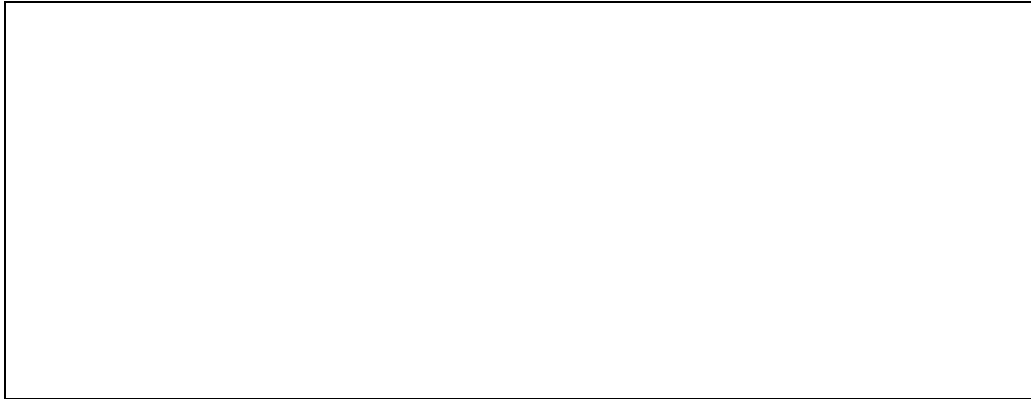
5.2 Bereken de effectieve capaciteit C_{eff} van tegel type *A* voor de evaluatietijd t_{eval} . Neem de juiste K_{eq} uit voorbeeld 5.3 van Rabaey draft 2^e editie. Neem alleen de bijdragen van onderstaande tabel en verwaarloos de capaciteit van het metaal, deze is klein t.o.v. de andere capaciteiten. Vul uw (deel-) uitkomsten in in onderstaande tabel.

Bijdrage	Afmetingen in λ, λ^2	Afmetingen in μ, μ^2	K_{eq}	C [fF]
Diffusie oppervlak	λ^2	μ^2		
Diffusie rand	λ	μ		
Gate overlap	λ	μ	1	
Totaal	XXX	XXX	XXX	

5.5 Teken een RC schema voor de worst-case precharge tijd, en een tweede schema voor de worst-case evaluatie tijd. Geef duidelijk de relevante parameters (component waarden) aan, kies daarvoor uit de onderstaande tabel. Andere capaciteiten en weerstanden (zoals

bijvoorbeeld de ingangscapaciteiten van de invertoren en bedradingsweerstand) mogen verwaarloosd worden. **N.B.** Met worst-case wordt in dit geval de tijd bedoeld die hoort bij de 1-hoog code waarvoor de vertraging het grootst is.

R_p	Aan-weerstand van precharge transistor
R_e	Aan-weerstand van evaluatie transistor
R_{pdn}	Aan-weerstand van pull-down transistor
C_A	Capaciteit van tegel type A
C_B	Capaciteit van tegel type B

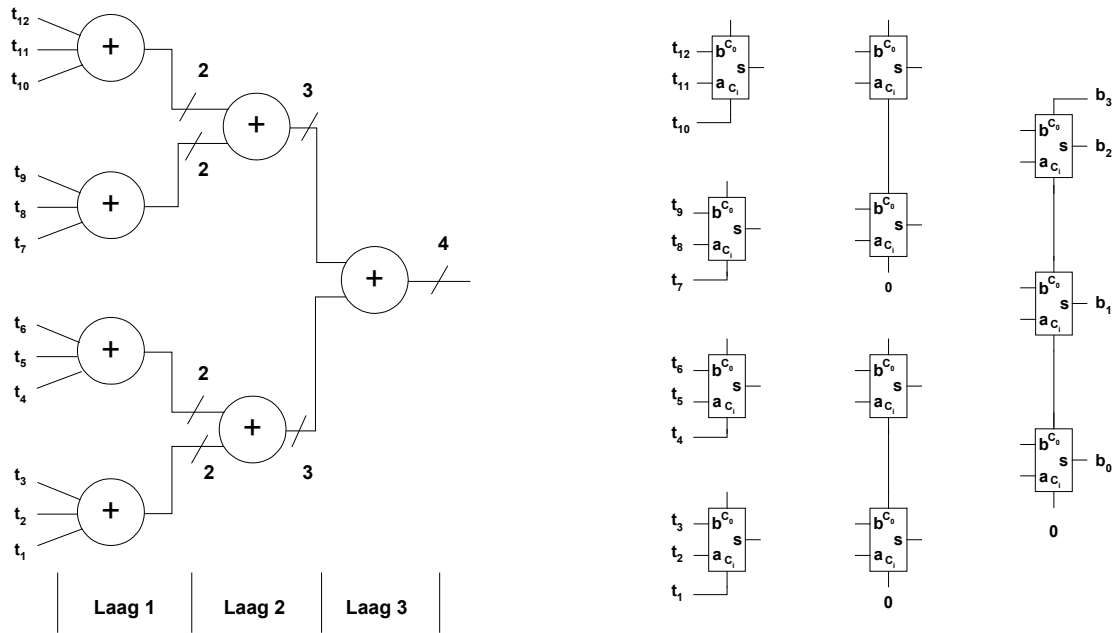


5.6 Stel nu dat de effectieve capaciteit van tegel A en B voor de laag-naar-hoog transitie gegeven worden door respectievelijk 3 fF en 0.5 fF. Dimensioneer de precharge transistor (geef W/L, bij minimum L) voor een worst-case precharge tijd van 0.75 ns.

W/L =
Berekening:

Een potentieel probleem bij flash AD omzeters zoals hier besproken is het optreden van zogenaamde luchtbel-fouten in de thermometer code. Bijvoorbeeld tengevolge van het niet gelijk zijn van alle vertragingen in de schakeling, zullen niet alle thermometer uitgangen precies op tijd schakelen. Het resultaat is dat er soms een nul kan staan tussen een reeks éénen. Dit lijkt op een luchtbel in een kwikbuis, vandaar de naam. Een luchtbelfout geeft natuurlijk aanleiding tot een foute waarde aan de binaire uitgang, omdat er meer dan één rij van de NOR poorten actief is, waarbij de fout relatief groot kan zijn. Ter voorkoming van dit probleem kan ook een andere manier van thermometer-naar-binair omzetten gekozen worden, nl. het tellen van het aantal enen. De fout die veroorzaakt wordt door een luchtbel is dan slechts gelijk aan één discretisatie niveau.

Het tellen van het aantal enen kan geschieden door ieder bit van de thermometer code te beschouwen als een 1-bit getal, en al die getallen bij elkaar op te tellen. Voor de optellers kun je dan normale full-adder cellen gebruiken, en om 63 bits bij elkaar op te tellen kun je de optelling onderverdelen in lagen. Iedere laag heeft een aantal optellers, maar dit aantal neemt af bij hogere lagen, terwijl de bitbreedte van iedere opteller toeneemt. In de tekening hieronder links is dit principe weergegeven en zijn de bitbreedtes aangegeven door de schuine streepjes met het cijfer.



5.7 Geef in de tekening hierboven rechts aan hoe de verschillende Full-Adder cellen met elkaar verbonden moeten worden, m.a.w. maak de schakeling af door de bedrading te tekenen.

5.8 De schakeling hierboven is, zoals getekend, geschikt voor een 12-bits thermometer code. Hoe kun je de schakeling modifieren, zonder extra componenten (zoals Full-Adders of andere logische poorten) te gebruiken, zodanig dat hij een 15-bits thermometer code kan omzetten naar binair?