

Bennie Mols

Kijkduinstraat 121-2

1055 XW Amsterdam

benniemols@gmail.com

Studiegroep Wiskunde met de Industrie 2008

Micro-elektromechanische schakelaars voor mobiele telefoons

Voor de toepassing van micro-elektromechanische schakelaars in mobiele telefoons staan de ontwikkelaars voor een wiskundig probleem: hoe vind je in een groot landschap van mogelijkheden de stabiele evenwichtoplossingen van een bewegende plaatcondensator? Ten tijde van SWI2008, eind januari 2008, werd dit probleem ingebracht door het bedrijf NXP Semiconductors. Later in 2008 nam het bedrijf Epcos AG de RF-MEMS activiteiten van NXP over. Maar ook na de overname werken NXP en Epcos nog samen op het gebied van RF MEMS-schakelaars.

De meest voorkomende schakelaar in elektronische circuits is de transistor. Hij is klein, snel schakelbaar en goedkoop. Toch heeft een transistor ook nadelen. Juist omdat hij van halfgeleidermateriaal is gemaakt, treden er hogere vermogensverliezen op dan bij een elektromechanische schakelaar, die alleen maar goede elektrische geleiders gebruikt.

De elektromechanische schakelaar kent een lange traditie. Samuel Morse gebruikte er voor het eerst eentje in 1844, toen hij het eerste telegraafbericht van Washington DC naar Baltimore verstuurde. Door het gebruik van transistors sinds de tweede helft van de 20ste eeuw, is de elektromechanische schakelaar lange tijd uit beeld geweest. Inmiddels bestaat er echter een hernieuwde belangstelling. Zo werken de bedrijven Epcos Nederland en NXP Semiconductors samen aan een moderne miniatuurversie van de elektromechanische schakelaar, speciaal be-

doeld voor het schakelen van radiofrequente (RF) signalen in mobiele telefoons: een micro-elektromechanische schakelaar, of RF MEMS.

Een RF MEMS biedt twee belangrijke voordelen. “De antenneverstand van een mobiele telefoon wordt sterk beïnvloed door externe factoren, zoals hoe je je hand en je hoofd ten opzichte van de antenne houdt”, vertelt Jiri Stulemeijer van de ontwikkelingsafdeling van Epcos. “Hierdoor kan een groot deel van het vermogen dat uit de versterker komt reflecteren en komt het niet bij de antenne. Daardoor gaat de batterij van de telefoon sneller leeg. Met een adaptief netwerk, dat gebruik maakt van MEMS-schakelaars, willen we continu een optimale instelling creëren, zodat signaalvermogen niet verloren gaat en de batterij langer meegaat.”

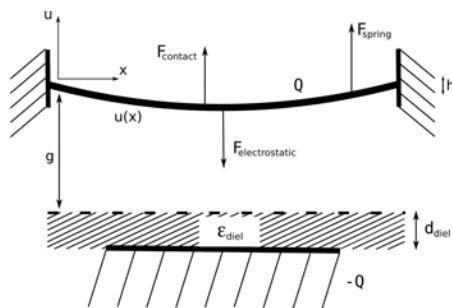
Het tweede voordeel zit in de multifunctionaliteit van een MEMS-schakelaar. Stulemeijer: “Nu gebruikt een mobieltje voor iede-

re frequentieband een andere versterker: voor GSM, UMTS, WLAN, Bluetooth, enzovoort. Met een MEMS kun je één schakelbare versterker bouwen voor alle frequentiebanden. Hierdoor vermindert het aantal componenten in de telefoon, terwijl de versterker altijd efficiënt gebruikt wordt. Ook dit tweede voordeel van een MEMS-schakelaar verlengt de levensduur van de batterij.”

Krachtenspel

Een MEMS is in feite een condensator bestaand uit twee vierkante plaatjes. Elk plaatje heeft zijden van slechts enkele tienden van een millimeter. Het onderste plaatje zit vast, en het bovenste plaatje kan bewegen. Wanneer een elektrische spanning over de twee plaatjes wordt aangebracht, beweegt het bovenste plaatje naar het onderste. Als gevolg daarvan, buigt het bovenste plaatje als een veer door. De krachten op het bovenste plaatje hangen af van de aangelegde spanning en zijn positie. Bij een bepaalde spanning zijn er in principe meerdere evenwichtstoestanden mogelijk.

Maar behalve de veerkracht en de elektrostatische kracht, spelen nog twee andere krachten een rol. Als de schakelaar dicht



Figuur 1 Schematische doorsnede van een capacitieve RF MEMS schakelaar

staat, dan raakt de bovenste elektrode een isolerende laag op de onderste. Dat resulteert in een contactkracht, die zich gedraagt als die van een sterk niet-lineaire veer. Verder moet er bij het dichtgaan van de schakelaar lucht uit de spleet tussen de twee elektroden worden geduwd. Daarvoor is ook een kracht nodig: de luchtspleetdempingskracht.

“Wat we nu willen weten,” zegt projectleider Peter Steeneken van het RF MEMS-onderzoek bij NXP Semiconductors, “is de verplaatsing van de bovenste plaat, waarbij op elk punt de elektrostatische kracht die het plaatje naar beneden trekt in evenwicht is met de veerkracht die het plaatje terug naar boven trekt. Bovendien willen we weten of het bereikte evenwicht stabiel of instabiel is. Sommige evenwichten zijn namelijk instabiel: als je er een klein zetje aan zou geven, dan raakt het plaatje uit zijn evenwicht. In de praktijk kan een MEMS alleen maar stabiele evenwichtstoestanden aannemen.”

Energiefunctionaal

Vijaya Raghav Ambati (UT), Andreas Asheim (NTNU, Noorwegen), Jan Bouwe van den Berg, Bob Planqué, Michelangelo Vargas Rivera (VU), Yves van Gennip, Andriy Hlod, Erwin Vondenhoff (TU/e), Tymofiy Gerasimov (TU Delft), Martin van der Schans (UL) en Sjors van der Stelt (UvA) waren de wiskundigen die het MEMS-probleem hebben bestudeerd. “Omdat het fysische probleem al helemaal gemodelleerd was, konden wij meteen aan de slag met het wiskundige probleem”, vertelt Planqué. Als uitgangspunt werd de energiefunctieonaal gekozen: de functie die aangeeft hoe de energie afhangt van de variabelen in het MEMS-probleem, met name de afstand tussen de platen, de dielektrische eigenschappen van de platen en de spanning over de condensator. Grafisch voorgesteld, is de energiefunctieonaal een heuvelslandschap waarin de hoogte de energie voorstelt en de andere dimensies de variabelen in de energiefunctieonaal. Planqué: “De vraag is dan welke punten in het landschap een lokale minimale ener-

gie hebben. Dat zijn de stabiele evenwichten. De complicatie hierbij is, dat wat in de ene richting een minimum lijkt, in de andere richting een maximum kan lijken. Om de lokale minima te vinden moet niet alleen de eerste afgeleide van de energie in alle richtingen nul zijn, maar moet ook de tweede afgeleide in alle richtingen positief zijn.”

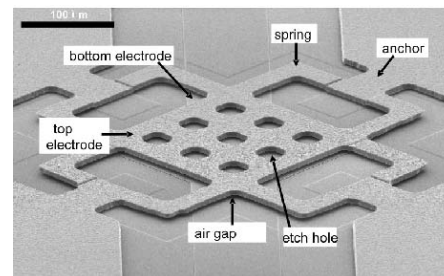
Een bewijs van instabiliteit is vaak makkelijker dan van stabiliteit: voor het eerste hoeft je maar één onstabiele richting te vinden, in het tweede geval moet je laten zien dat er geen instabiele richtingen zijn. Planqué: “Deze methode hebben we ook gebruikt om te laten zien dat een deel van de gevonden evenwichtoplossingen instabiel is. We konden in dat geval een goedgekozen richting vinden waarin de tweede afgeleide van de functionaal afnam.”

Twee factoren compliceren het vinden van lokale minima. Allereerst komt de mechanische energie als een vierde-orde term voor: een afgeleide in het kwadraat. Dat is vervelend. Ten tweede zijn de elektrostatische en de contact-energie niet-lineair. Voor het minimaliseren van functionalen met niet-lineaire termen, bestaat geen algemene oplossingsmethode. Planqué: “In deze aanpak maken we rijtjes functies met steeds lagere energie, en hopen dat dat rijtje convergeert naar een daadwerkelijk minimum. Dit is moeilijk voor convex-concave functionalen zoals hier.”

Lineariseren

Als je alleen maar naar hele kleine uitwijkingen ten opzichte van een ruststand kijkt, dan mag je het probleem lineariseren en alle hogere orde niet-lineaire termen schrappen. Planqué: “Deze lineaire vergelijking kunnen we zelfs analytisch oplossen, zodat we al het nodige kunnen leren uit de structuur van de evenwichtoplossingen.”

Door de linearisering kan echter niet het hele fysische probleem worden beschreven. Het hysteresegedrag van een MEMS-schakelaar — waarbij het gedrag op een bepaald moment afhankelijk is van de voorgeschiedenis — is een uitvloeisel van de niet-lineariteit van het probleem, terwijl het niet volgt uit het lineaire probleem. Verder konden de wiskundigen laten zien dat de numerieke methode die Epcos zelf al had ontwikkeld, de standaard wiskundige methode is om dit soort problemen op te lossen. De onderzoekers van Epcos en NXP pasten de methode toe zonder te weten dat hij in de literatuur al bestond. De studiegroep heeft ten slotte ook nog een aantal eigenschappen bewezen van het



Figuur 2 Opname van een capacitieve RF MEMS schakelaar gemaakt met een scanning elektronen microscoop

contactprobleem: het probleem dat ontstaat wanneer de bovenste condensatorplaat de onderste raakt. Planqué: “Als de elektrische spanning langzaam wordt verhoogd, raakt de bovenste plaat de onderste eerst in één punt. Wij hebben wiskundig bewezen dat als je de spanning nog wat verder opvoert er in eerste instantie toch maar één contactpunt blijft. Pas na een tijdje, als de spanning nog verder toeneemt, ontstaat er een contactoppervlak. Dit fenomeen was nieuw voor Epcos en NXP.”

Commercieel product

“Voor ons heeft de studiegroep twee belangrijke resultaten opgeleverd”, vertelt Jiri Stulemeijer van Epcos. “Ten eerste heeft de studiegroep ons geholpen met het benoemen van een oplossingsmethode die we in feite zelf al hadden gevonden. Daarmee hebben ze ons ook extra achtergronden bij die methode geleverd. Ten tweede heeft de studiegroep aan de hand van een paar voorbeelden laten zien hoe je de stabiliteit van de MEMS analytisch kunt bepalen. Dat helpt ons om complexere toestanden van de MEMS beter te interpreteren. Waarom is een bepaalde oplossing stabiel of instabiel? Dat zie je beter aan de analytische oplossing dan aan de numerieke oplossing. Verder weten we nu ook dat sommige problemen in het algemeen niet oplosbaar zijn, en ook dat is handig om te weten.”

In de praktijk van het MEMS-onderzoek bij Epcos en NXP loopt het modelleren parallel aan het experimenteren in de cleanroom van het bedrijf. Wat de onderzoekers in de modellen zien, vinden ze ook terug in de metingen. Momenteel wordt dit soort MEMS nog niet gebruikt in mobiele telefoons. Voordat ze daadwerkelijk toegepast kunnen worden, moet eerst aangetoond worden dat ze betrouwbaar genoeg zijn en jarenlang meegaan. “We hebben al veel testen uitgevoerd en verwachten de eerste commerciële producten in de nabije toekomst”, aldus Stulemeijer. “De fabrikanten van mobiele telefoons zijn enthousiast en we zien dan ook een goede toekomst voor deze technologie.”