

Ontwerp van een ECM-actuator

Snel en nauwkeurig bewegen met piëzo

M. van Zutphen

Bij Philips Domestic Appliances and Personal Care (D.A.P.) te Drachten wordt onderzoek gedaan naar het zogenaamde Electrochemical Machining, ECM (elektrochemisch bewerken). Bij dit bewerkingsproces wordt het werkstuk gevormd door plaatselijke oplossing in een elektrolyt, onder invloed van een elektrische stroom. De elektrode (het "gereedschap") dient bij deze techniek zeer nauwkeurig gepositioneerd te worden. Daarnaast worden korte positioneertijden verlangd.

Nauwkeurig positioneren en dat in korte tijd, zijn eisen die moeilijker met elkaar zijn te verenigen naarmate de te verplaatsen massa groter wordt. Om aan de gewenste dynamische eigenschappen te voldoen, blijkt een hoge servostijfheid noodzakelijk. In enkele proefopstellingen zijn met succes hydraulische actuatoren ingezet. Deze zijn echter relatief kostbaar. Bovendien is lekkage van olie in de elektrolyt absoluut uit den boze, aangezien de immense filterinstallatie hier zeer gevoelig voor is. Daarom is behoefte ontstaan aan een elektromechanische actuator op basis van een ander werkingsprincipe.

Voor dit probleem werd contact opgenomen met de vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering van de Universiteit Twente. In het kader van de doctoraalopdracht van de auteur is, onder leiding van prof. dr. ir. M.P. Koster en dr. ir. J. van Dijk, een ontwerp gemaakt voor een proefopstelling. Dit artikel is een korte beschrijving van het resultaat [1].

Gevraagde specificaties

De ECM-techniek heeft een aantal voordelen ten opzichte van andere bewerkingstechnieken.

Naast de zeer hoge bereikbare nauwkeurigheid, de onafhankelijkheid van de hardheid van het te bewerken metaal en de lange levensduur van de elektrode, is tevens het ontbreken van bewerkingskrachten een pluspunt. Keerzijde van de medaille is dat aan de elektrode zeer hoge positioneereisen worden gesteld. De grootte van de spleet tussen werkstuk en elektrode heeft namelijk een belangrijke invloed op het verloop van het elektrochemisch proces. Daarnaast moet constant gewaakt worden voor vonkoverslag, daar dit gezien de enorme stroomsterktes (enkele honderden ampères!) desastreuze gevolgen zou hebben.

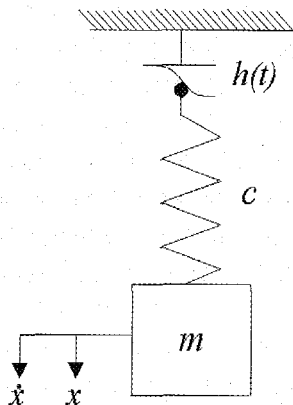
De actuator voor de elektrode moet zowel kunnen transleren als roteren. De maximumtranslatie is 2 mm, terwijl de rotatie ten minste een gehele omwenteling moet bedragen. De vereiste positioneernauwkeurigheden zijn respectievelijk 0,5 μm en 1 mrad. Tijdens het proces worden verschillende positioneeracties uitgevoerd, waarbij een translatie van 3 μm in een tijd van 1 ms door de daarvoor benodigde hoge versnelling de lastigste is. Voor rotaties is de positioneertijd van ondergeschikt belang. De nadruk bij het ontwerp zal dan ook op de snelle lineaire bewegingen liggen.

Keuze van de werkingsprincipes

Tijdens bedrijf ontstaat in de actuator een dynamisch krachtenspel dat afhankelijk is van de te verplaatsen massa en het opgelegde bewegingspatroon. Om aan de bovengenoemde positie-eisen te kunnen voldoen, moet het systeem van actuator en regelkring (de servo) beschikken over een zekere stijfheid, dat wil zeggen de verhouding tussen positieafwijking en uitgeoefende kracht. Gezien de eisen zal deze servostijfheid naar verwachting een belangrijk selectie criterium zijn bij de keuze tussen de verschillende actuatorprincipes. Het is daarom zinvol om, met een eenvoudig model, inzicht te krijgen in de minimaal vereiste servostijfheid.

Translatie

Elk mechanisme kunnen we in dynamisch opzicht vereenvoudigen tot een discreet stelsel van massa's en veren. Aangezien nog niets van de uiteindelijke actuator bekend is, gaan we in eerste instantie uit van een model met één veer en één massa, zie figuur 1.



Figuur 1.
Model met één veer
en één massa.

De veer c stelt hier de servostijfheid voor, m is de elektrodemassa en $h(t)$ het verplaatsingsvoorschrift. Is $h(t)$ een zogenaamde scheve sinus dan geldt voor dit model de formule [2]:

$$u_0 = \frac{h_m}{\pi} \left(\frac{2\pi}{t_m} \sqrt{\frac{m}{c}} \right)^3$$

Hierin is u_0 de plaatsfout onmiddellijk na de bewegingstijd t_m en h_m de maximale verplaatsing. Nemen we $u_0 = 0,5$ m, $h_m = 3$ m, $t_m = 1 \cdot 10^{-3}$ s en $m = 1$ kg, dan volgt hieruit $c = 6 \cdot 10^7$ N/m. Dit is dus de minimum vereiste stijfheid die de actuator in combinatie met de regeling moet kunnen realiseren.

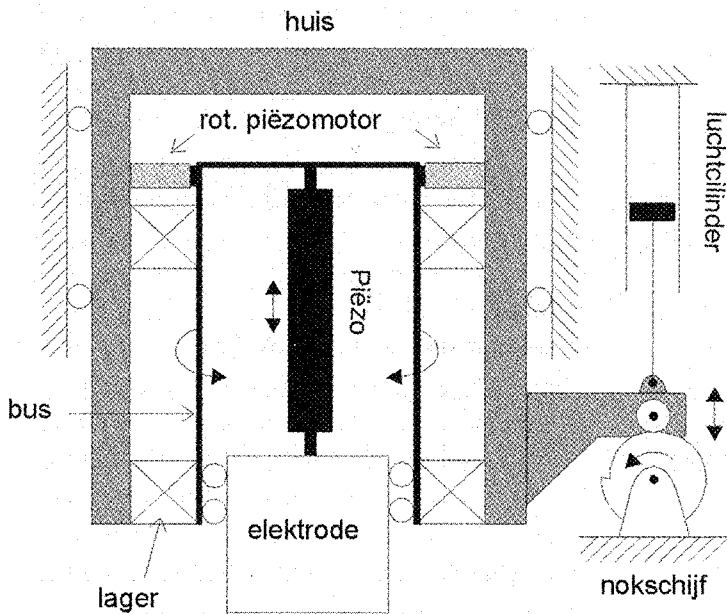
Pneumatische cilinders hebben typisch een servostijfheid van de orde $10^4 - 10^5$ N/m en zijn voor dit doel daarom ongeschikt. Lineaire elektromagnetische aandrijvingen zijn met zware elektronische versterkers en voedingen in principe stijf genoeg te maken, maar dit is kostbaar en brengt tevens warmteproblemen met zich mee. Piëzo-elektrische actuatoren leveren weliswaar een kleine slag, maar bezitten een inherente hoge stijfheid. Een tweetrapsaandrijving met een minder snelle eerste trap en een piëzo-actuator als tweede trap zou dus aan de eisen kunnen voldoen. Om deze reden is besloten een proefopstelling te ontwerpen op basis van dit idee.

Rotatie

Voor de rotatie zijn, zoals genoemd, de dynamische eisen veel minder stringent. De absolute positienauwkeurigheid van 1 mrad is echter vrij hoog. Een aardige variant op de "wandellende" lineaire piëzomotor [3] maakt het mogelijk met een zeer hoge nauwkeurigheid te roteren over een in principe onbegrensde hoek. Dit type motor heeft daarnaast als voordeel dat het inbouwwolume beperkt is. Mede om deze redenen zal de rotatie piëzomotor dan ook in de proefopstelling worden opgenomen.

Opbouw van de actuator

De gekozen principes dienen samen één translend en roterend mechanisme te vormen. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden. Met name de ont koppeling van de bewegingen en de uitvoering het tweetrapsprincipe verdient hierbij speciale aandacht. Rekening houdend met zaken als maakbaarheid, compactheid en eenvoud van het ontwerp is gekomen tot de opbouw van figuur 2.



Figuur 2. Schematische opbouw van de actuator.

De rotatiepiëzomotor is gedraadvonkt uit plaatmateriaal en drijft een gelagerde bus aan met daarin de translatiepiëzo. Het geheel is opgenomen in een huis dat via een rechtgeleiding met de vaste wereld verbonden is. De lange slag is omwille van de stijfheid en robuustheid uitgevoerd met een nokmechanisme dat wordt voorgespannen met een persluchtcilinder. Deze cilinder kan tevens gebruikt worden om het gehele mechanisme enige centimeters op te lichten voor gereedschapswisselingen en dergelijke.

Uitwerking van het ontwerp

Het conceptuele ontwerp kan nu verder worden uitgewerkt tot een realiseerbaar prototype. Van de belangrijkste aspecten volgt hier een toelichting.

Piëzo en elektrodehouder

De Duitse fabrikant Physik Instrumente (PI) levert een uitgebreid scala aan kant-en-klare piëzo-actuatoren, zowel voor hoge voltages (HV, max. 1000 V) als voor lage (LV, max. 120 V). Ze bestaan uit een piëzostack (actuator bestaande uit gestapelde laagjes piëzomateriaal) die onder voorspanning zit

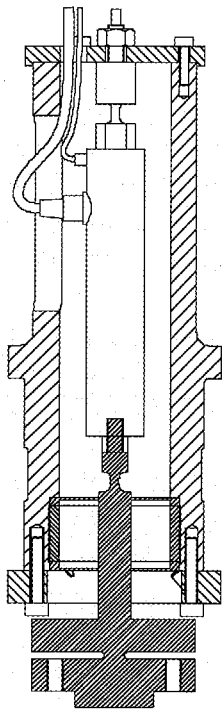
opgesloten in een bus van roestvaststaal met aan beide zijden een schroefbevestiging. De actuatoren zijn tevens leverbaar in een uitvoering waarbij rekstrookjes op de piëzo zijn aangebracht waarmee de verlenging van de piëzo kan worden gemeten. Op deze wijze is relatief eenvoudig een nauwkeurige positieterugkoppeling te implementeren. Daarnaast levert PI verschillende typen versterkers, waaronder ook hoog-vermogen versterkers met een grote bandbreedte voor zeer dynamische toepassingen als deze.

De HV- en LV-actuatoren zijn vergelijkbaar qua slag en maximale kracht. Bij de keuze voor één van beide typen spelen voornamelijk de volgende aspecten een rol:

- mechanische stijfheid,
- capaciteit in verband met elektrische tijdconstante,
- beschikbaarheid van versterkers met voldoende vermogen,
- inbouwvolume,
- prijs.

HV-actuatoren zijn bij gelijke slag kleiner dan hun LV-equivalenten. Daarnaast bezitten de LV-actuatoren een aanzienlijk hogere capaciteit doordat ze uit meer (dunnere) laagjes bestaan. Ondanks de lagere spanning moet de versterker dan meestal toch een grotere stroom leveren om dezelfde laadtijd te realiseren. Daar staat tegenover dat versterkers voor lage voltages beter beschikbaar – en daardoor goedkoper – zijn dan voor hoge voltages. De prijs van de LV-actuatoren zelf ligt juist weer wat hoger door de toegepaste dunne-lagen techniek. De stijfheid blijkt echter de bepalende factor: door hun duidelijk hogere mechanische stijfheid is de vereiste gesloten-lus-stijfheid veel gemakkelijker met een HV-piëzo-actuator te realiseren. Dit type geniet daardoor de voorkeur.

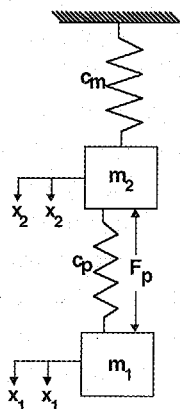
Gekozen is voor een type met een slag van 80 μm bij een spanning van 1000 V. Deze piëzo heeft een eigen stijfheid van $4,5 \cdot 10^7 \text{ N/m}$. Er is tevens een spanningsversterker leverbaar met een piekstroom van 0,5 A, noodzakelijk om de vereiste snelle laadtijden te realiseren.



Figuur 3.
Piëzo met
rechtgeleiding en
elektrodehouder,
opgehangen in
de lagerbus.

Piëzomateriaal is keramisch en daardoor erg bros. De actuatoren moeten om die reden beschermd worden tegen buigende momenten door een juiste manier van inklemmen. Dit is hier gerealiseerd door de verbindingselementen tussen de piëzo en zijn omgeving plaatselijk te verdunnen. De "scharnieren" die zo ontstaan zijn relatief slap voor buigende momenten, terwijl de axiale stijfheid er naar verhouding weinig onder lijdt.

Voor de beweging van de elektrode moet een rechtgeleiding worden ontworpen, die spelingsvrij en liefst ook onderhoudsvrij is. Omdat het slechts om zeer kleine bewegingen gaat, ligt de keuze voor een mechanisme op basis van elasti-



Figuur 4.
Vierde-orde model
van de translatie.

sche elementen voor de hand. In figuur 3 is de toegepaste oplossing te zien. De massieve staaf met de elektrodehouder is opgenomen in een stelsel van twee dunne ronde platen. De verdikkingen aan de randen van de platen worden vastgeklemd in de lagerbus.

Lagerkeuze

Voor de rotatie is een lager ingebouwd. Dit lager zorgt voor de koppeling van de snelle fijne slag aan de trage lange slag. Het lager is daarom een belangrijke schakel in het geheel, en zal aan bepaalde eisen inzake rondlooptrouwbaarheid, speling en stijfheid moeten voldoen. Het geven van een streefwaarde voor de stijfheid is niet zonder meer mogelijk, aangezien deze bepaald wordt door het dynamisch gedrag van het mechanisme. Met behulp van een model met twee massa's en twee veren, een zogenaamd vierde orde model, kan een schatting gemaakt worden van de vereiste stijfheid. Nemen we als massa's:

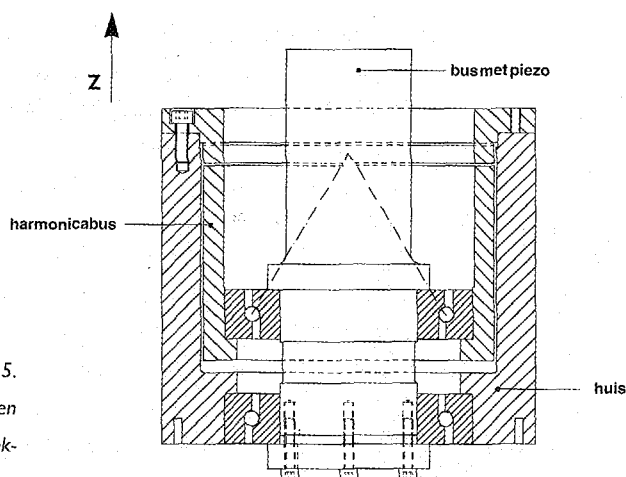
$$m_1 = \text{massa v/d elektrode} + \text{helft v/d piëzo},$$

$$m_2 = \text{helft v/d piëzo} + \text{bus} + \text{helft v/d lagere},$$

dan ontstaat het systeem van figuur 4.

Hierin is c_m de stijfheid van het lager, c_p de eigen stijfheid van de piëzo en F_p de kracht die door de piëzo wordt geleverd. Met behulp van de theorie van H. Groenhuis [4], met $m_1 = 1$ kg en $m_2 = 2$ kg, verkrijgen we $c_m = 2,8 \cdot 10^8$ N/m. Deze hoge stijfheid is niet eenvoudig te realiseren. Luchtlagers kunnen alleen met heel grote lagervlakken en extreem kleine spleten een dergelijke waarde halen. Een hydrodynamisch lager heeft er minder moeite mee, maar komt gezien de wens van de opdrachtgever vanzelfsprekend niet in aanmerking. Alleen lagertypen waarvan de werking berust op afroling blijven over. Om zowel in radiale als in axiale richting voldoende stijfheid te verkrijgen, is voor (precisie-) hoek-contactlagers gekozen.

Hoekcontactlagers moeten worden toegepast in voorgespannen paren om axiale krachten te kunnen opvangen. Hiervoor is een zogenaamde



Figuur 5.
Voorspannen van de hoek-contactlagen.

harmonicabus gebruikt [5]. Dit is een holle bus die door enkele handig geplaatste zaagsneden relatief slap is in z , r_x en r_y -richting, zie figuur 5. Deze manier van inbouwen heeft als voordeel dat de voorspanning goed te definiëren is, en introduceert geen overbepaaldheden.

Rotatiepiëzomotor

Tussen het huis en de bus bevindt zich de piëzomotor voor rotatie. Deze motor is gebaseerd op de translatiepiëzomotor [3], die werkt op basis van het zogenaamde wandelprincipe: de relatief kleine bewegingen van een enkele piëzo worden aaneengeregend tot een willekeurig

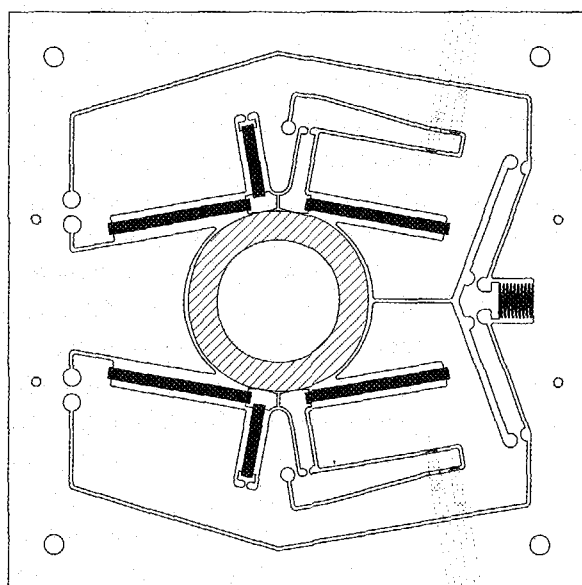
grote verplaatsing, met behoud van de zeer hoge nauwkeurigheid. Wanneer de wandelbeweging wordt uitgevoerd langs de mantel van een cilinder levert dit een rotatie op. In figuur 6 is dit principe uitgewerkt.

Het gehele mechanisme is gemaakt door de vorm te draadvonken uit een plaat roestvast staal van 8 mm dik. De twee helften worden ten opzichte van elkaar voorgespannen met een spiraalveer (rechts in de tekening). De zwarte vlakjes stellen de piëzo's voor. De korte piëzo's zorgen voor het klemmen van de "voetjes", de langere leveren de "wandel"-beweging. Het bewegingspatroon van de piëzo's is zodanig dat steeds één stel van de twee stel klempiëzo's is bekrachtigd, waarbij het corresponderende stel wandelpiëzo's geactiveerd wordt. Een vloeiende beweging ontstaat, doordat de andere piëzo's de beweging overnemen zodra het einde van de slag bijna bereikt is.

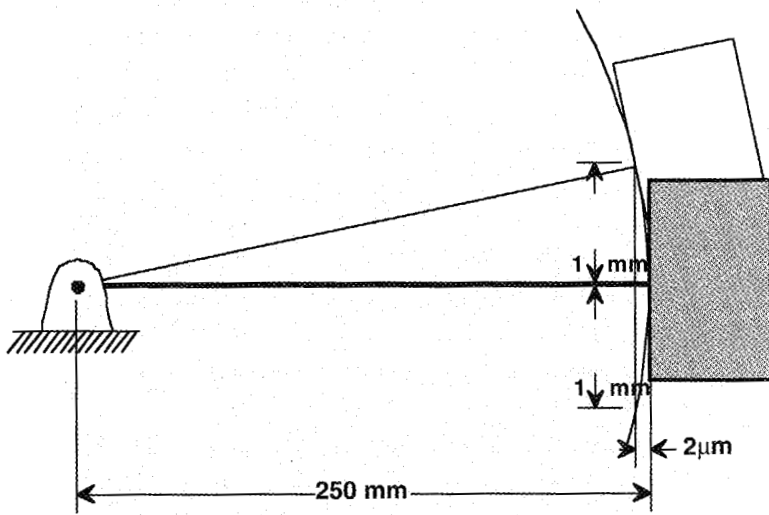
Voor de aansturing van de motor wordt een nauwkeurige incrementele hoek-encoder tussen de bus en het huis gemonteerd.

Lange slag

Aangezien de lange en de korte slag met elkaar in serie staan, is de stijfheid hier opnieuw een belangrijk aandachtspunt. In de dynamische modellen is de verbinding tussen het huis en de vaste wereld namelijk "oneindig" stijf verondersteld. De geldigheid van deze modellen neemt af naarmate deze stijfheid dichterbij de buurt van de overige stijfheden komt te liggen. Om deze reden is gekozen voor een nokmechanisme als aandrijving. Wanneer een dergelijk systeem goed wordt voorgespannen, valt een zeer hoge stijfheid te realiseren. In dit opzicht is het tevens gunstig dat de benodigde slag slechts 2 mm bedraagt. Dit kan met een directe sturing door de nok. Daardoor zijn geen hefboomen nodig, die de stijfheid verminderen. Ook de rechtgeleiding voor de lange slag dient spelings- en onderhoudsvrij te zijn.



Figuur 6.
Piëzomotor voor grote rotaties.



Figuur 7. Lange arm als quasi-rechtgeleiding. Rechtgeleidingen op basis van kogellagers krijgen bij deze kleine, repeterende bewegingen last van overmatige slijtage. Een rechtgeleiding met elastische elementen verdient daarom de voorkeur.

Een complicerende factor is hier dat voor gereedchapswisselingen translaties tot circa 50 mm nodig zijn. Het pad dat de geleiding voorschrijft hoeft echter niet noodzakelijkerwijs een rechte lijn te zijn. Alleen over het traject van 2 mm wordt vereist dat de zijdelingse verplaatsingen en de rotaties klein blijven. Door het huis aan een lange scharnierende arm te bevestigen, ver-

krijgen we een quasi-rechtgeleiding: bij kleine verplaatsingen in de z-richting zal de zijdelingse beweging slechts zeer gering zijn, terwijl ook de hoekfout verwaarloosbaar is. Bij een toelaatbare zijdelingse plaatsfout van 2 μm is een arm van circa 250 mm nodig, wat een realistische waarde is, zie ook figuur 7. Een kruisveerscharnier met – omwille van de stijfheid – een extra brede bladveer in z-richting vormt de verbinding met de vaste wereld.

Complete opstelling

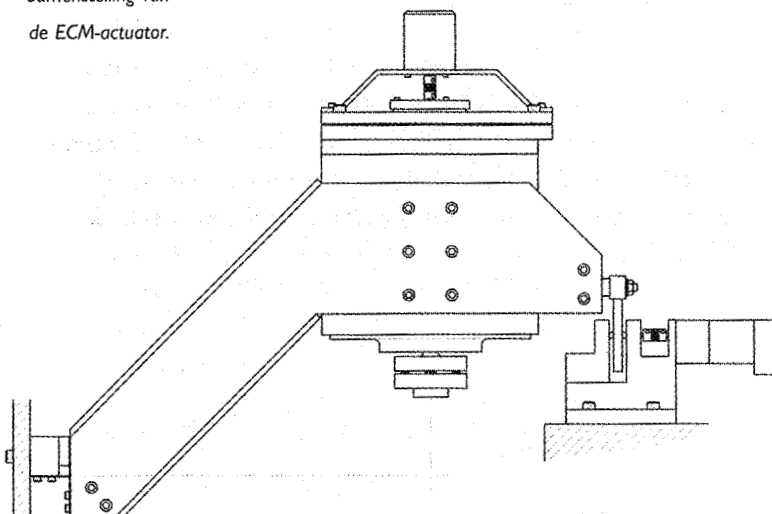
In figuur 8 is de complete opstelling afgebeeld. Het elektrode-oppervlak ligt op het niveau van het kruisveerscharnier, aangezien hier de cirkelbaan het best een rechte lijn benadert. De luchtcilinder voor het voorspannen en de gereedchapswisselingen is niet getekend, ook is de bevestiging aan de vaste wereld nog niet uitgewerkt. De aandrijving van de nokschijf vindt plaats met behulp van een elektromotor met vertraging.

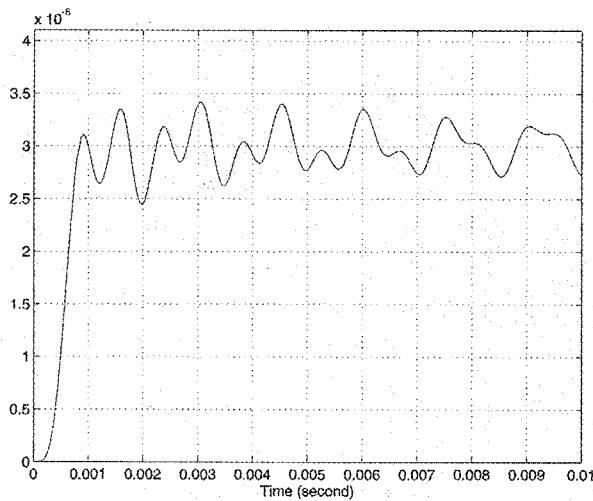
Analyse

Van het translatiedeel van het uiteindelijke ontwerp zijn numerieke analyses uitgevoerd (Matlab/Simulink). In het gebruikte model zijn alle belangrijke massa's en stijfheden meegenomen, alsmede het elektromechanische gedrag van de piëzo. Na het toevoegen van een eenvoudige regelaar werd tevens een indicatie verkregen van het te verwachten positioneergedrag. De eisen met betrekking tot de nauwkeurigheid bleken alle gehaald te worden. In figuur 9 is één responsie weergegeven. De benodigde stroom bleef steeds beneden 100 mA, hetgeen de gekozen versterker zonder al te veel moeite kan leveren.

De maximum rotatiesnelheid van de piëzomotor wordt beperkt door de laagste eigenfrequentie van het stelsel klempiëzo-schoen. Berekend kan worden dat bij het gekozen ontwerp een omwenteling ten minste circa 7 seconden zal duren.

Figuur 8. Samenstelling van de ECM-actuator.





Figuur 9.
Responsie van het
model op een set-
point van $3 \mu\text{m}$
in 1 ms.

Conclusies

Het prototype-ontwerp lijkt gezien de simulaties aan de gestelde eisen te voldoen. Hierbij dient wel opgemerkt te worden dat modellen altijd een beperkte weergave zijn van de werkelijkheid, zodat men de waarde ervan niet mag overschatten. De invloed van sensorruis is bijvoorbeeld niet gemodelleerd. In de praktijk zal moeten blijken of de actuator daadwerkelijk voldoende presteert.

De rotatie verloopt vrij traag, maar hieraan werden dan ook geen expliciete eisen gesteld. Enige optimalisatie van het mechanisme is hier overigens nog mogelijk.

Philips D.A.P. heeft plannen om het ontwerp in samenwerking met de Universiteit Twente te realiseren. Men hoopt hiermee aan te kunnen tonen dat het principe werkt en hoopt daarbij tevens inzicht te krijgen in de problemen die men na realisatie nog kan tegen komen.

Auteursnoot

Ir. M. van Zutphen is momenteel werkzaam bij het Centrum voor Fabricagetechnieken van Philips. Dit artikel is een bewerking van zijn afstudeerrapport.

Literatuur

- [1] M. van Zutphen, "Ontwerp van een translerende en roterende ECM-actuator", afstudeerrapport WA576, vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering, Universiteit Twente, 1998
- [2] M.P. Koster, "Dynamisch gedrag van constructies en mechanismen", collegedictaat 113137, Universiteit Twente, 1995
- [3] M.P. Koster, A. Visser, "Een lineaire piëzomotor", Mikroniek 1993, nr. 33: p.183-186
- [4] H. Groenhuis, "A design tool for electromechanical servo systems", proefschrift, Universiteit Twente, 1991
- [5] M.P. Koster, "Constructieprincipes voor het nauwkeurig bewegen en positioneren", Uitgeverij Universiteit Twente, Enschede, 1996

Erratum

In het artikel "Nauwkeurig bewegen in het nanometergebied" in Mikroniek 38(1998)6 p. 166 - 172 zijn de μ 's verdwenen in de paragraaf "Evaluatie van de meetresultaten". Waar nu m

staat had μm moeten staan. Het werkelijke resultaat was dus 10^6 maal beter dan er staat vermeld en dat scheelt niet te verwaarlozen beetje. Onze excuses aan de auteurs en onze lezers.