

Piëzo-elektrische aandrijvingen

Ontwerp en toepassing

M.P. Koster Piëzo-elektrische actuatoren worden steeds belangrijker. Hun voordelen – eenvoudige constructie en snelle reactietijd – gaan helaas gepaard met het bezwaar van een kleine slag. In dit artikel wordt beschreven hoe het ontwerp van heen- en weergaande piëzo-elektrische aandrijvingen kan worden geoptimaliseerd. Het artikel eindigt met een overzicht van piëzo-elektrische aandrijvingen waarin door een kunstgreep het bezwaar van een kleine slag is ondervangen.

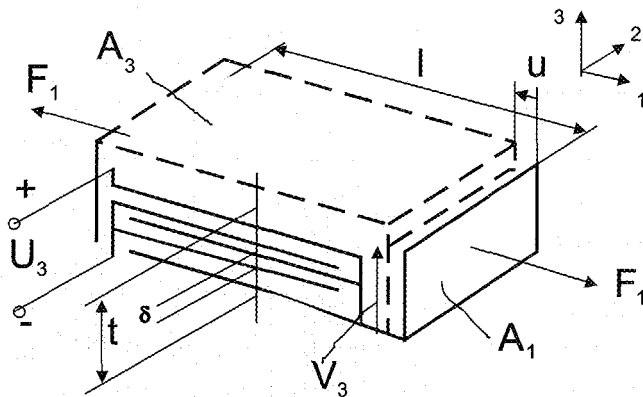
In elektromechanische systemen wordt elektrische energie omgezet in mechanische energie. Vandaag de dag gaat het daarbij vooral om het principe van elektrodynamische energie-omzetting. Volgens dat principe ondervindt enerzijds een stroomgeleidend lichaam in een magnetisch veld een kracht, anderzijds wordt er een elektrische spanning opgewekt als dat lichaam door het veld beweegt. Een bezwaar van dit soort energie-omzetting was de geringe energiedichtheid, maar de toepassing van magnetische materialen met elementen uit de lanthaanreeks (“zeldzame aarden”) heeft dit bezwaar grotendeels ondervangen. Een ander bezwaar is de ingewikkelde fysieke configuratie. Er is een spoel nodig, alsmede lagers of een rechtgeleiding. Hoewel er interessante resultaten zijn bereikt, blijft de miniaturisatie van servomotoren [1] een moeilijk karwei. Een voordeel van elektrodynamische energie-omzetting is dat er een aanzienlijk deel van de toegevoerde energie daadwerkelijk in de versnelde belasting terechtkomt. Bij de optimale afstemming van de massa van de motor op die van de belasting – 1:1 – bedraagt dat aandeel 50%.

Vanuit het oogpunt van miniaturisatie kunnen de bezwaren van elektrodynamische energie-omzetting worden ondervangen door de toepas-

sing van het piëzo-elektrische effect. Het kenmerk van dit effect is dat een piëzo-keramisch lichaam van vorm verandert als dat in een elektrisch veld wordt geplaatst. Omgekeerd resulteert mechanische vervorming in een elektrische spanning.

Een piëzo-elektrische actuator is niet meer dan een vast lichaam dat kleiner of groter wordt. Er is in het geheel geen sprake van wrijving, noch van slijtage of speling. Door zijn eenvoud is een piëzo-elektrische actuator bijzonder geschikt om te worden geminiaturiseerd. Door de maximaal toelaatbare veldsterkte in het isolerende keramische materiaal moet de rek ten gevolge van het piëzo-elektrische effect relatief klein blijven: niet groter dan ongeveer 10^{-3} .

Aan weerszijden van het piëzo-elektrische materiaal zijn elektroden aangebracht, die samen met dat dielektricum een condensator met een aanzienlijke capaciteit vormen. Een ander bezwaar van de piëzo-elektrische actuator is daarom dat een deel van de toegevoerde energie wordt opgeslagen in deze condensator. Bij de optimale afstemming van de stijfheid van belasting op die van de actuator – 1:1 – wordt slechts 16% van de toegevoerde elektrische energie omgezet in mechanische energie.



Figuur 1.
Meerlaags piëzo-elektrische actuator.

Het piëzo-elektrische effect

Figuur 1 laat het principe van een meerlaags piëzo-elektrische actuator zien.

Dunne lagen piëzo-keramisch materiaal met een dikte δ van circa 20 μm zijn - gescheiden door elektroden - in de richting van coördinaat 3 op elkaar gestapeld tot een maximale hoogte t van 1 tot 2 mm. Om fabricagetechnische redenen is deze hoogte beperkt. De kristallieten van het piëzo-keramische materiaal zijn te beschouwen als elektrische dipolen [2]. De aangelegde spanning U_3 zorgt voor de opbouw van een elektrostatisch veld V_3 . De elektrostatische krachten die werken op de dipolen, dwingen deze langer te worden. De verlenging in de 3-richting is gekoppeld aan een samentrekking in de 1-richting, in overeenstemming met de waarde van de constante van Poisson ν : voor piëzo-keramisch materiaal ongeveer gelijk aan 0,3. De samentrekking in de 1-richting kan desondanks nuttig worden gebruikt, want de lengte l heeft (in tegenstelling tot de hoogte t) geen fabricagetechnische begrenzing. Meerlaags keramische actuatoren (CMA's) worden daarom toegepast als zogenaamde d_{31} -actuators, waarbij het veld in de 3-richting wordt aangebracht. Het mechanische effect wordt in de 1-richting gebruikt.

De vergelijkingen die het gedrag van de piëzo-elektrische actuator bepalen, zijn:

$$Q = CU + dF \quad (1)$$

$$x = dU + (1/c) F$$

met Q [C] als de elektrische lading, x [m] als de verlenging in een richting parallel aan de lagen, U [V] als de elektrische spanning over de elektroden en F [N] als de mechanische belasting, eveneens parallel aan de lagen. Verder geldt voor de capaciteit van (t/δ) lagen met ieder een oppervlakte van A_3 [m^2]:

$$c = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A_3}{\delta} \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad [\text{F}]$$

met ϵ_0 als de permeabiliteit in vacuüm en ϵ_r als de relatieve permeabiliteit van het piëzo-elektrische materiaal.

De grootte $d = d_{31}(l/\delta)$ [in m/V of C/N] is een maat voor de piëzo-elektrische koppeling. De piëzo-elektrische ladingsconstante d_{31} voor een verplaatsing parallel aan de lagen is een materiaaleigenschap.

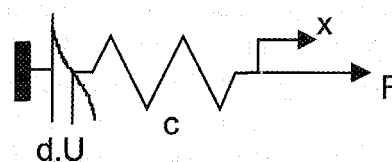
De grootte $c = E A_1/l$ [N/m] is de mechanische stijfheid in de 1-richting, met A_1 [m^2] als de oppervlakte van de dwarsdoorsnede in de richting van het 2,3-vlak.

Het model voor een piëzo-elektrische actuator

Uit de vergelijkingen (1) volgt:

$$x = d.U + F/c.$$

Deze uitdrukking is gevisualiseerd in het model van figuur 2.1.

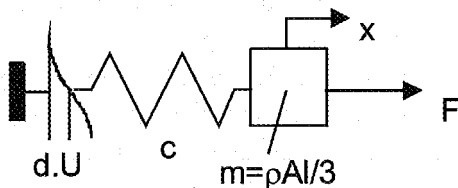


Figuur 2.1. Statisch model van een piëzo-elektrische actuator.

In dit model is $d.U$ te beschouwen als de gewenste verplaatsing voor het geval de elektrische spanning wordt gestuurd. De stijfheid c stelt de elasticiteit voor. Het model wordt vervolgens gecompleteerd door het toevoegen van massa-traagheid. De massa wordt geacht uniform over de actuator te zijn verdeeld. Verder nemen we aan dat een model met één graad van vrijheid met een eigenfrequentie die overeenkomt met de werkelijke laagste eigenfrequentie, een voldoende bruikbare benadering is voor het massa-aandeel in een systeem dat uit meer onderdelen bestaat. Voor een actuator die is te beschouwen als een longitudinaal trillende staaf, wordt de laagste eigenfrequentie benaderd als:

$$\omega_c = \sqrt{\frac{3c}{m_2}}$$

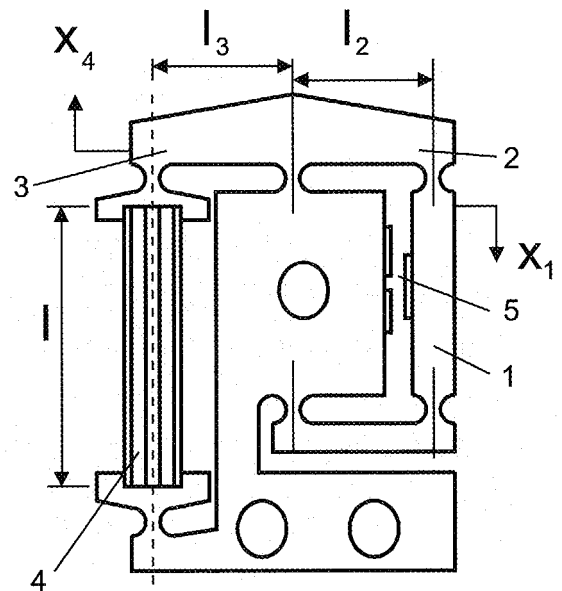
met m_2 gelijk aan de massa van de actuator. Figuur 2.2 laat het model zien met geconcentreerde massa, $m = \rho A l / 3$.



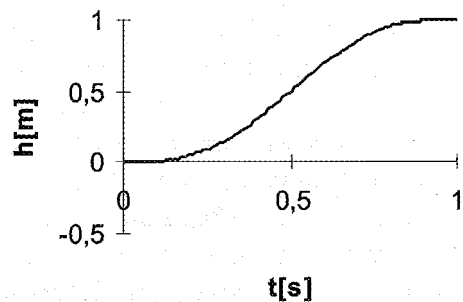
Figuur 2.2. Dynamisch model van de piëzo-elektrische actuator.

Het optimaliseren van een piëzo-elektrische aandrijving

Doseernaald (1) in figuur 3 ondergaat de gewenste uitgaande beweging: rust-beweging-rust volgens de functie $h(t)$ in figuur 4. Hefboom (2,3) heeft een overbrengingsverhouding $i = l_2 / l_3$. De piëzo-elektrische actuator is aangegeven als (4). Met (5) wordt een capacitieve verplaatsingsopnemer bedoeld.

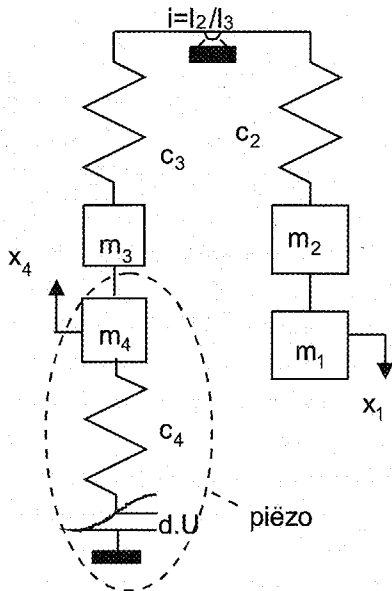


Figuur 3. Piëzo-elektrische aandrijving.

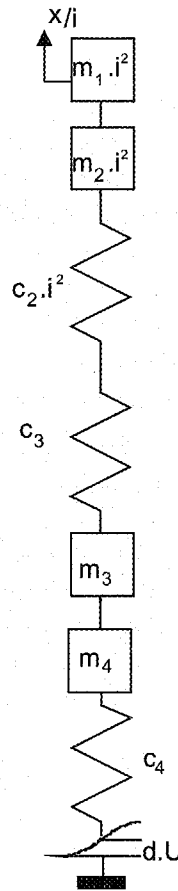


Figuur 4. Verplaatsingsfunctie $h(t)$.

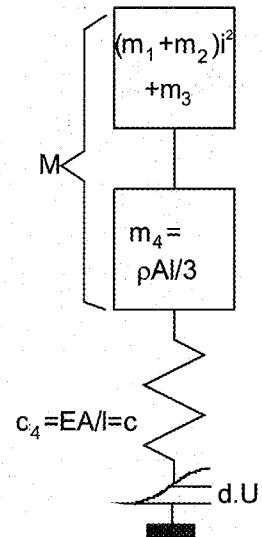
Het dynamische model van het mechanisme met geconcentreerde massa's is weergegeven in figuur 5. In het getransformeerde model van figuur 6 is het mogelijk de numerieke waarden van de respectievelijke massa's en stijfheden te vergelijken. Als we voor dit geval aannemen dat $1/(c_2 i^2) + 1/c_3 \ll 1/c_4$, dan is het model van figuur 7 met slechts één graad van vrijheid x/i een voldoende benadering.



Figuur 5. Dynamisch model.



Figuur 6. Getransformeerd model.



Figuur 7. Gereduceerd model.

We kunnen besluiten de actuator op te nemen in een geregeld systeem met terugkoppeling. Zie kader volgende pagina.

Omdat de actuator van zichzelf al een aanzienlijke stijfheid c_4 bezit, kan het systeem ook zonder regelaar een goede prestatie leveren. Maatgevend voor de dynamische prestatie is de laagste eigenfrequentie. Als we figuur 7 beschouwen, zien we dat deze eigenfrequentie kan worden geschreven als

$$\omega_e^2 = \frac{c_4}{(m_1 + m_2) i^2 + m_3 + m_4}$$

Met $m_1 + m_2 = m_r$, $\zeta_{34} = m_3 / (\rho A l)$ en met de volgende uitdrukking voor de geluidssnelheid in piëzo-elektrisch keramiek

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

kunnen we de eigenfrequentie van het systeem schrijven als

$$\omega_e^2 = \frac{v_s^2}{l^2} \frac{1}{\frac{m_r i^2}{\rho A l} + \zeta_{34} + \frac{1}{3}} \quad (5)$$

De verplaatsing die de actuator kan uitvoeren, is beperkt. Met behulp van vergelijking (1) vinden we

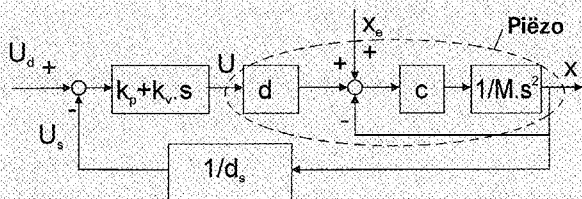
$$x = d_{31} (l/\delta) U$$

De bovengrens van de veldsterkte $U/(\delta)$ hangt af van de isolerende eigenschappen van het piëzo-elektrische materiaal. De bovengrens voor de specifieke verlenging, de "piëzo-rek", wordt bepaald door

$$\epsilon_{p31} = (x/l)_{\max} = d_{31}(U_3/\delta)_{\max}$$

Terugkoppeling

Figuur 8 toont het blokschema van het geregelde systeem. We passen een PD-regelaar $k_p + k_v s$ toe. De verplaatsingsopnemer is aangegeven als $1/d_s$.



Figuur 8. Blokschema van de piëzo-elektrische aandrijving met teruggekoppelde PD-regeling. M is de totale bewegende massa.

De overdrachtsfunctie van het geregelde systeem is gelijk aan

$$\frac{x}{U_d} = \frac{(k_p + k_v s) d \cdot c}{N(s)} \quad (2)$$

waarin U_d het bewegingsvoorschrift en x de actuele beweging voorstelt. De overdrachtsfunctie voor verstoringen x_e is

$$\frac{x}{x_e} = \frac{c}{N(s)} \quad (3)$$

waarin

$$N(s) = Ms^2 + \frac{k_v d \cdot c}{d_s} s + \frac{c(k_p d + d_s)}{d_s} \quad (4)$$

Als $1/d_s$ en k_p groot zijn, heeft overdrachtsfunctie (2) een ruime bandbreedte en een geringe gevoeligheid voor storingen volgens vergelijking (3).

Het soort storingen waarom het hier gaat, zijn thermische uitzetting en drift van het piëzo-elektrische materiaal. Die vormen de belangrijkste reden om een teruggekoppelde regeling toe te passen. Een tweede reden kan het verhogen van de stijfheid $c(k_p d + d_s)/d_s$, zie vergelijking (4), zijn en daarmee het vergroten van de bandbreedte ten einde snel en nauwkeurig te kunnen bewegen. Een derde reden kan ten slotte het verbeteren van de stapresponsie zijn met behulp van de differentiërende werking $k_v dc/ds$, zie (4), van de regelaar. Immers, een piëzo-elektrische actuator bezit nauwelijks enige inwendige demping.

Voor PXE-materiaal [3] geldt $\epsilon_{p31} = 0,3 \cdot 10^{-3}$.

Om een bepaalde verplaatsing h_m te bereiken is daarom een lengte l van de actuator nodig, die volgt uit $l = h_m / \epsilon_p$. Ter plaatse van de naald (1) in figuur 3 is de verplaatsing gelijk aan $h_m^* = i \cdot h_m$. De benodigde lengte van de actuator bedraagt dan

$$l = h_m^* / (i \cdot \epsilon_p) \quad (6)$$

Uit de vergelijkingen voor de eigenfrequentie (5) en de lengte (6) volgt

$$\omega_e^2 = \frac{v_s^2 i^2 \epsilon_p^2}{h_m^*{}^2 \left(\frac{m \cdot i^3 \epsilon_p}{\rho A h_m^*} + \zeta_{34} + \frac{1}{3} \right)}$$

Via de overbrengingsverhouding van hefboom (3) kan de actuator optimaal op de belasting worden afgestemd:

$$\delta \omega_e^2 / \delta i = 0 \text{ levert}$$

$$i_{opt}^3 = \frac{2 \rho A h_m^*}{3 m \epsilon_p} \quad (7)$$

De optimale eigenfrequentie is dan gelijk aan

$$\omega_{opt} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3}{3 + \zeta_{34}} v_s \left(\frac{\rho A}{m} \right)^{1/3} \left(\frac{\epsilon_p}{h_m^*} \right)^{2/3}} \quad (8)$$

De dynamische eigenschappen van het systeem worden kennelijk bepaald door de materiaaleigenschappen v_s , ρ en ϵ_p , en verder door de geconstrueerde massa m (zo klein mogelijk) en door de opgelegde slag h_m^* .

Er is nu nog één vrije parameter over: oppervlakte A van de dwarsdoorsnede. Hoe groter A , des te groter i moet zijn en des te sneller het systeem reageert. Het volume van het piëzo-elektrische lichaam is een maat voor de prijs en is gelijk aan

$$Vol_{opt} = (Al)_{opt} = \frac{3}{2} \frac{m}{\rho} i^2_{opt} \quad (9)$$

Voorbeeld:

Massa van de doseernaald etc.: $m_1 + m_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ kg, $m_3 = 0$.

Verplaatsing: $h^*_m = 0,2 \cdot 10^{-3}$ m.

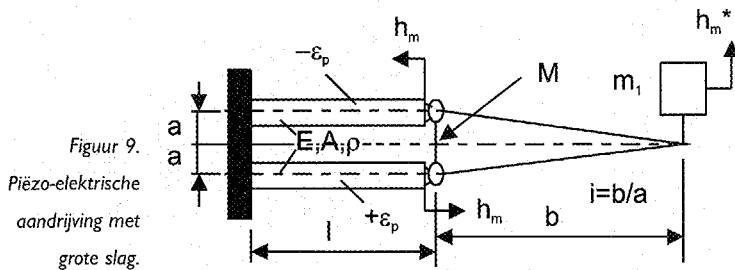
Actuator type: $d_{31}, \epsilon_{p31} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, geluidssnelheid in het piëzo-elektrische keramiek: $v_s = 3000$ m/s, dichtheid: $\rho = 8000$ kg/m³.

Neem $A = 4 \cdot 8 \cdot 10^{-6}$ m².

Als een bewegingstijd $t_m = 10^{-3}$ s beschikbaar is en als $h(t)$, zie figuur 4, een tweedegraads bewegingsfunctie is, dan bedraagt de positioneerfout aan de uitgang niet meer dan 10^{-6} m [4].

Overbrengingsverhouding

Zoals de uitdrukkingen (7) en (8) laten zien, speelt de overbrengingsverhouding een cruciale rol bij het afstemmen van de actuator op de belasting. Het lijkt aantrekkelijk de slag van een piëzo-elektrische aandrijving te vergroten via een overbrenging, bijvoorbeeld met verhouding $i=b/a$, zie figuur 9.



Figuur 9. Piëzo-elektrische aandrijving met grote slag.

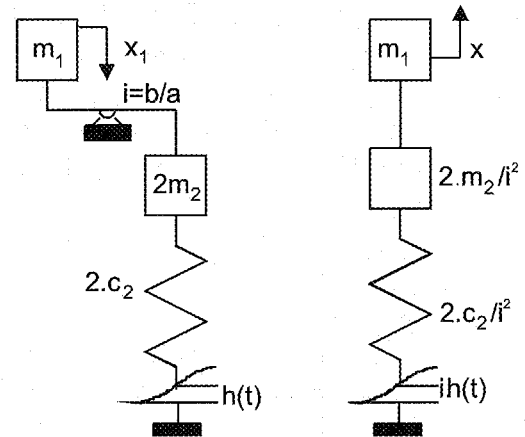
In dit schema leveren beide actuatoren gelijktijdig een even grote verplaatsing, maar wel in tegengestelde richting. M is het draaipunt.

De verplaatsing aan de uitgang ter plaatse van massa m_1 is gelijk aan

$$h^*_m = i \cdot \epsilon_p \cdot l \quad (10)$$

Als het mechanisme erg stijf is, kan figuur 9a beschouwd worden als het dynamische model, met figuur 9b als getransformeerd model. De stijfheid van het systeem is dan gelijk aan

$$c^* = 2c_2 / i^2 = 2EA / (li^2).$$



Figuur 9a.

Figuur 9b

Dynamisch model van een piëzo-elektrische aandrijving met grote slag.

Getransformeerd model.

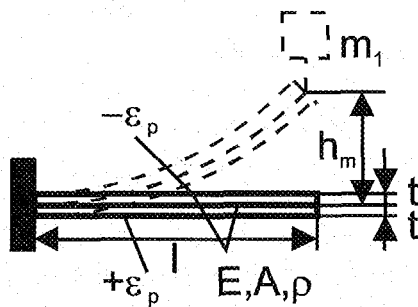
Blijkbaar neemt de stijfheid aanzienlijk af als er gekozen wordt voor een overbrengingsverhouding $i \gg 1$! We stellen de geconcentreerde massa's van de actuatoren gelijk aan

$$2m_2 / i^2 \sim 2(\rho Al / 3) / i^2.$$

De laagste eigenfrequentie van dit systeem, met massa m_1 aan de uitgang, bedraagt dan

$$\omega^2_{dim} = 2EA / (2\rho Al^2/3 + m_1 li^2). \quad (11)$$

Een configuratie met een grote overbrengingsverhouding is de bekende bimorfe actuator of buiger, zie figuur 10.



Figuur 10.
Bimorfe actuator.

Bij deze configuratie zijn twee lagen piëzo-keramisch materiaal met tegengestelde polarisatie op elkaar gekit. Het resultaat is een staafvormige actuator die kan buigen. De theorie over bimetalen leert dat de zijdelingse verplaatsing van het vrije uiteinde gelijk is aan

$$h_m^* = \frac{3}{4} \frac{\epsilon_p l^2}{t} \quad (12)$$

De stijfheid van een bimorfe actuator met dikte $2t$ is gelijk aan

$$c = 2Ebt^3 / l^3$$

Met behulp van beschouwingen over de eigenfrequentie kan de effectieve massa aan het vrije uiteinde van de buiger worden benaderd door:

$$m_1 \sim 2\rho Al / 4,$$

waarin A gelijk is aan de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van één staaf ter dikte t .

Met m_1 gelijk aan de massa aan de uitgang kan de geschatte laagste eigenfrequentie worden uitgedrukt als

$$\omega_{ebi}^2 = 2Ebt^3 / (l^3(\rho Al / 2 + m_1)). \quad (13)$$

Door de uitdrukkingen (10) en (12) te vergelijken kunnen we berekenen hoe groot de overbrengingsverhouding moet zijn voor gelijke

verplaatsingen van de mechanismen van figuur 9 en 10:

$$i = 3l / (4t). \quad (14)$$

Met behulp van deze overbrengingsverhouding i kunnen we nu de eigenfrequenties volgens de vergelijkingen (11) en (13) van beide systemen met elkaar vergelijken:

met $m_1 \gg 2m_2 / i^2$ (zie figuur 9b) geldt:

$$\omega_{clin} / \omega_{ebi} \sim 4/3;$$

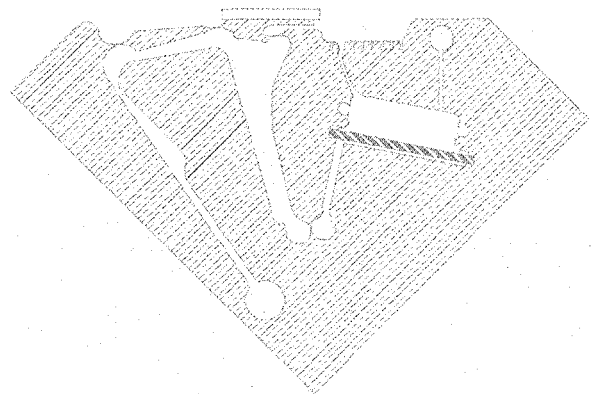
met $m_1 \ll 2m_2 / i^2$ geldt:

$$\omega_{clin} / \omega_{ebi} \sim \sqrt{3l / (4t)};$$

Daar $i = 3l / (4t)$ bijvoorbeeld ongeveer gelijk zal zijn aan $3 \cdot 20 / (4 \cdot 2) = 7,5$, geldt in de praktijk meestal $m_1 \gg 2m_2 / i^2$. In elk geval zal bij gelijke uitslagen aan het uiteinde de bimorfe buiger niet de snelste van de twee systemen zijn.

Toepassingen

Figuur 11 laat een piëzo-elektrisch aangedreven constructie zien voor het sturen van een laserbundel via een spiegel [5].



Figuur 11. Piëzo-elektrisch aangedreven spiegel.

Gegevens:

aftasthoek: 0,012 rad,
 massa traagheidsmoment van de spiegel:
 $J=4,92 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$,
 overbrenging (de rotatie van de spiegel in verhouding tot de uitslag van het piëzo-elektrische element): $i=900 \text{ r/m}$,
 teruggekoppelde regeling,
 meetelement rekstrookje,
 laagste eigenfrequentie bij uitgeschakelde regeling: $f_e=1400 \text{ Hz}$,
 bandbreedte bij ingeschakelde regeling: 2000 Hz.

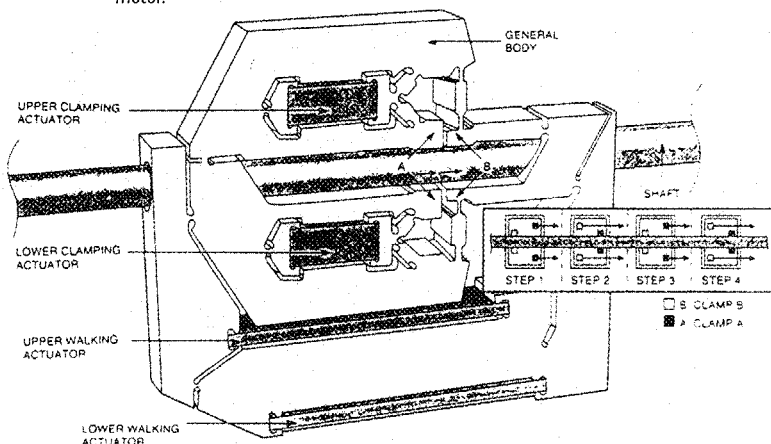
Vergroting van de slag

Piëzo-elektrische aandrijvingen van het bovenbeschreven type hebben een slag die niet groter is dan enkele tiende millimeters. We zagen namelijk hoe moeilijk het is de stijfheid te realiseren die nodig is om voldoende bandbreedte te handhaven bij vergroting van de overbrengingsverhouding. De meeste constructies die slagvergroting tot doel hebben, zijn gebaseerd op het loopprincipe. Dat betekent het optellen van de achtereenvolgende actuatorverplaatsingen.

Aan het eind van de jaren zestig lanceerde Burleigh [6] de "inch-worm". De lineaire piëzo-motor van Philips [7], zie figuur 12, betekende een verbetering van dat concept wat betreft snel-

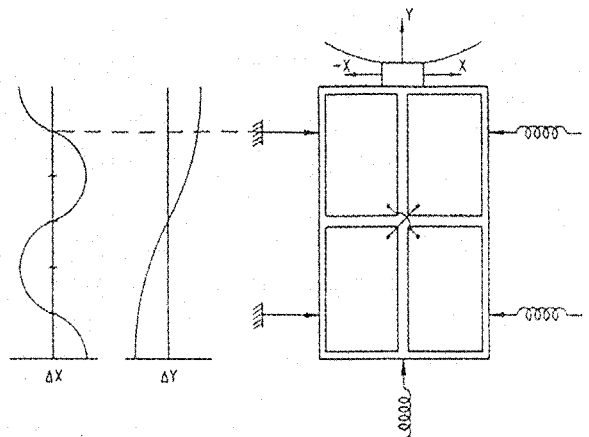
Figuur 12.

Lineaire piëzo-motor.



heid (50 mm/s), slijtvastheid (afgelegde weg > 20 km) en positienauwkeurigheid (fout < 30 nm).

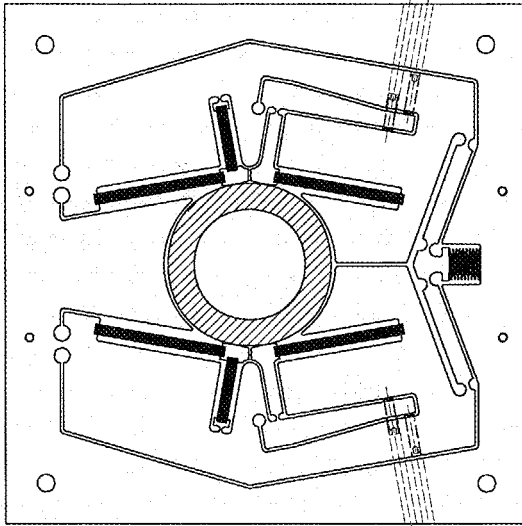
Nanomotion [8] ontwikkelde een ultrasone piëzo-elektrische aandrijving, zie figuur 13. Bij dit concept beweegt een piëzo-elektrisch lichaam in twee trilvormen, waarbij zowel langs- als buigtrillingen van gelijke frequentie - circa 40 kHz - worden opgewekt. De fase tussen de beide trilvormen bepaalt de (elliptische) baan van de tip die botst tegen het aan te drijven lichaam. Dat lichaam wordt in de x-richting rechtgeleid. De wrijvingskracht die behoort bij de botskracht (in de y-richting), versnelt het lichaam in de x-richting.



Figuur 13. Ultrasone lineaire piëzo-elektrische aandrijving [8].

Er is ook een roterende variant van de lineaire piëzomotor ontworpen [9], zie figuur 14. Dit ontwerp is bedoeld voor een resolutie van 10^{-6} rad.

Een andere bekende ultrasone roterende motor is de lopende-golf-motor [10]. Een ring is voorzien van twee lagen piëzo-elektrisch materiaal. Het opwekken van een tweetal staande golven met een faseverschil van $\pi/2$ resulteert in een lopende golf.



Figuur 14.
Rotatie piëzomotor.

Tot slot

Het voorgaande toont aan dat de bandbreedte van piëzo-elektrisch aangedreven heen- en weergaande systemen heel goed is te optimaliseren door de overbrengingsverhouding te beschouwen als ontwerpparameter.

Het bezwaar van de beperkte slag van piëzo-elektrische aandrijvingen kan worden ondervangen door gebruik te maken van het - al dan niet ultrasone - loopprincipe of van het lopende-golf-concept. Op die manier is een nage-nog onbeperkte slag te realiseren.

Auteursnoot

Prof.dr.ir. M.P. Koster is werkzaam bij Philips CFT Mechatronics en aan de Universiteit Twente, C.J. Drebber Institute for Systems Engineering. Het artikel is eerder verschenen in Journal A, vol. 39, no. 1, 1998 onder de titel: Piezo Electric Drives: Design and Application.

Vertaling en bewerking: Frans Zuurveen.

Literatuur

- [1] RMB Roulements Miniatures SA, Box 121, CH2500 Biel;
- [2] K. Ruschmeyer et al, Piezokeramik, Expert Verlag Renningen 1995;
- [3] J.W.Waanders Piezo Electric Ceramics, Properties and Applications, Philips Components Eindhoven 1991;
- [4] M.P.Koster, W.T.C.v.Luene, T.J.A. de Vries, Mechatronica Colledictaat 124151, Universiteit Twente 1998;
- [5] R.v.d.Berg, Kantelspiegel met piëzo-aandrijving, Universiteit Twente, 1997;
- [6] Burleigh Instruments, US Patent 3902084, 1975;
- [7] M.P.Koster, A. Visscher, Een lineaire piëzomotor, Mikroniek 33 nr.6, 1993;
- [8] Eur. Patent 0633616A2, Nanomotion Ltd., Haifa Israel;
- [9] M.v.Zutphen, Roterende piëzo-motor, Universiteit Twente, 1997;
- [10] Toshiku Sashida and Takashi Kenjo, An introduction to Ultrasonic Motors, Clarendon Press Oxford, 1993.