

Kojinete magnetikoak: marruskadurarik gabeko teknologia

J. Jugo

GAUDEE ikerketa taldea
Elektrizitate eta Elektronika saila, EHU

I. Arredondo

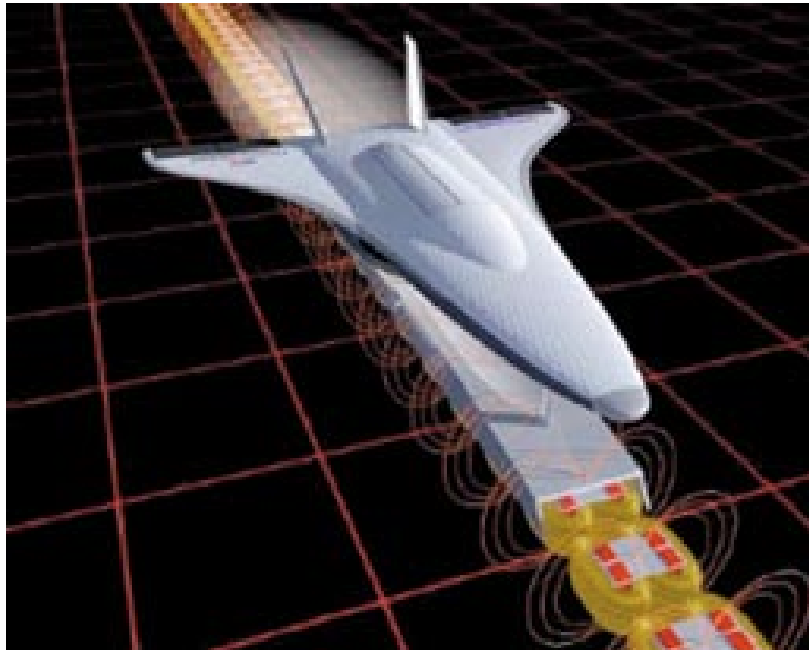
GAUDEE ikerketa taldea
Sistemen Ingeniaritza eta Automatika saila, EHU

Laburpena: Nahiz eta lebitazio magnetikoaren agerpena azken mendearen hasieran izan, batez ere 70eko hamarkadatik aurrera agertu dira bere aplikazio ugariak. Lebitazio magnetikoa baliagarria da hainbat tresna garatzeko, adibidez motor linealak, abiadura handiko *maglev* trenak, edo *maglev* transbordadoreak. Aplikazioen artean, kojinete magnetikoak oso interesgarriak dira abiadura handiko errotazioak lortzeko, marruskadurarik ez izateaz baliatzen baitira horrelakoetan. Teknologikoki konplexuak izanik ere, beren abantailek, batez ere, marruskadurarik eza, garbitasuna eta izaera aktiboa bezalako abantailek askotan justifikatzen dute gainprezioa eta industrian arlo askotan erabiltzen dira. Lan honetan, sistema hauen deskribapena egiteaz gain, beren aplikazio eta erronka nagusiak aurkeztuko dira. Azpimarratu behar da *maglev* kojinetetan oinarritutako sistemak diseinatzeko arlo anitzeko kontzeptuak garatu behar direla eta, horien artean, aipamen berezia merezi dutela kontrolak eta diseinu mekanikoak.

Abstract: Although the magnetic levitation technology appeared in the beginning of the last century, most of its abundant applications started to appear from the 70's decade. Magnetic levitation is valid for developing different devices, as for example linear motor, high speed *maglev* trains, or *maglev* space-launchers. From the applications, magnetic bearings are very interesting for the consecution of high speed rotations, due to the lack of mechanical friction in such situations. Being technologically complex, its advantages, specially, the lack of friction, the clean nature and the active nature justify the overprice in many situations and, in consequence, magnetic bearings are used in various industrial fields. In this work, apart of the description of this class of systems, its applications and main challenges are presented. It is must be remarked that in the design of *maglev* bearings systems concepts from different disciplines are needed and, in particular, the control and mechanical design are specially relevant.

1. SARRERA

Lebitazio magnetikoan oinarritutako abiadura handiko trenak sona handikoak izan dira eta askotan teknologiaren aurrerapen-ikur gisa agertu dira. Horiek, *maglev* trenak deritzenak, 70eko hamarkadan hasi ziren agertzen baina merkaturako aldaerak geroago agertu dira, 90eko hamarkadan batez ere. Bereziki Alemanian eta Japonian garatutako teknologietan oinarrituta, *maglev* trenak izan dira lebitazio magnetikoaren aplikazio deigarrienak. Hala ere, beste aplikazio batzuk ere nahiko ikusgarriak dira, *maglev* transbordadoreak esaterako (ikus 1. irudia). Kojineteak garatzeko erabilpena ez da, beharbada, hain deigarria baina industria-arloan garrantzia dauka, abiadura handiko errotazioa behar denean batez ere. Lan honetan, begirada bat botako diegu sistema hauen ezaugarri nagusiei eta aplikazioei. Horrez gain, kojinete magnetiko horien inguruko erronkak ere aipatuko dira.



1. irudia. Espazio-transbordadorea¹

Lebitazio magnetikoaren printzipioa ulertzea ez da oso zaila hasiera batean, grabitate-indarra konpentsatzeko indar magnetikoa erabiltzean baitatza (erakartzailea kasu batzuetan, aldaratzailea besteetan). Hain erraza dirudien

¹ Georgia Institute of Technology / PhysOrg.com-en oniritziarekin argitaratuta.

ideia hori baina, aldrebesten hasten da kontuan hartzen badugu horren inguruan jada 1842 urte urrunean agertu zen emaitza teorikoa: Earnshawen Teorema [1,2]. Honen arabera, ez da posible indar estatikoak erabiliz lebitazio-egoera egonkorra lortzea eta, bide klasikoetatik bederen, ezin dira erabili iman naturalak lebitazioa lortzeko. Hainbat bide daude arazo hori ekiditeko, baina elektroimanak erabiltzen dituen da gaur egun metodo hedatuena, elektroimaneke eremu eta indar magnetikoa aldatzea ahalbidetzen baitute korronte elektrikoari esker. Elektroiman hauen bidez ez da ekiditen era zuzenean aipatutako teoreman biltzen den ezegonkortasunaren arazoa baina elektroimaneke izaera aktiboa daukate eta, ondorioz, korrontea manipulatu bere portaera alda daiteke. Horrela, *maglev* sistema egonkorra izateko hariletik doan korrontea kalkula daiteke. Beraz, kasu bereziak kenduta, kontrolaren teoria aplikatzea ezinbestekoa izango da eta esparru honetan garrantzi handia duela esan daiteke. Bestalde, azpimarratu behar da gaur egun teknologia berriak garatzen ari direla iman pasiboetan oinarrituta, eta Earnshawen Teorematik eratorritako arazoak gainditzen dituzten material eta egitura bereziak erabiliz, [3].

Horrela, orokorrean, hainbat era daude lebitazioa lortzeko. *Maglev* trenetan erabiltzen dira era nagusiak: serboen bidez egonkortatutako suspentsio elektromagnetikoa (EMS electromagnetic suspension), suspentsio elektrodinamikoa (EDS electrodynamic suspension), eta Inductrack deritzona.

Teknologia pasiboan oinarrituta dagoen azken hau garapen fasean dago eta beharbada laster egongo da eskuragarri, [1]. Hemen lehenengo teknikari helduko diogu, indar erakartzaileetan oinarriturik dagoenari. Izan ere, hau da kojinete magnetikoetan erabiltzen dena.

Edozein kasutan, lebitazio magnetikoan oinarritzen diren sistemetan oso elkarrekintza garrantzitsuak gertatzen dira eragin elektromagnetiko eta mekanikoen artean, eta diseinu egokiak lortzeko, esparru anitzeko kontzeptuak hartu behar dira kontuan. Ondorioz, teknologiaren ikuspegitik korapilatsuak diren konponbideak behar dira, nahiz eta teknologia hau gero eta hobeto menperatzen eta garatzen ari den. Hala ere, teknologiaren heldutasuna ez da kasualitatearen fruitua, ikerketa lan ugari eta ezberdinen emaitza baizik; orokorrean beste arlo batzuetako tekniken bilakaeraren ondorioa da, esaterako sistema elektronikoen eta konputagailuen garapenaren ondorioa.

Teknika honen zailtasunak kontuan izanda, erraz ondoriozta daiteke arrazoi indartsuak egon behar direla lebitazio magnetikoak hain arreta handia erakartzeko. Batez ere, ukipen gabeko teknologia baten garapenak marruskadura mekanikoa ekiditea ahalbidetu du. Ondorioz, energia-galera han-

dia ez gertatzea lortzen da alde batetik, eta bestetik, bero-ekoizpena ere asko murrizten da. Horrela, errazagoa da abiadura handiko mugimenduak sortzea eta mantenua ere erraztu egiten da, adibidez *maglev* trenean baliatzen dira ezaugarri horretaz. Azken hau ulertzeko pentsatu behar da abiadura handia dagoenean normalean bero handia ere sortzen dela, lubrikazioa eta hozteko mekanismoren bat behar izaten da sistema ez kaltetzeko, edo gutxienez, funtzionamendua eta iraupena hobetzeko. Horrela, lebitazio magnetikoa oso erakargarria da mantenu txikia eta garbitasuna izatea garrantzitsua denean, espazioko edota biomedikuntzako aplikazioetan kasu.

Aplikazioak industriaren munduan ugariak dira, abiadura handiko *maglev* trenak barne. Badira beste batzuk hala nola motor linealak, *maglev* transbordadoreak (ingelesez, *maglev* launcher edo *maglev* gun) eta hemen aztertuko direnak, kojinete magnetikoak.

Hurrengo atalean, kojinete magnetikoen oinarrizko funtzionamendua azalduko da, bere ezaugarri nagusiak adieraziz. Gero, aplikazio garrantzitsuenak deskribatuko dira, teknologia honen abantailak argiago uzteko asmoz. Horrez gain, sistema hauen garapenerako egungo erronka nagusiak zein diren deskribatuko da.

2. KOJINETE MAGNETIKOETAN OINARRITUTAKO SISTEMAK

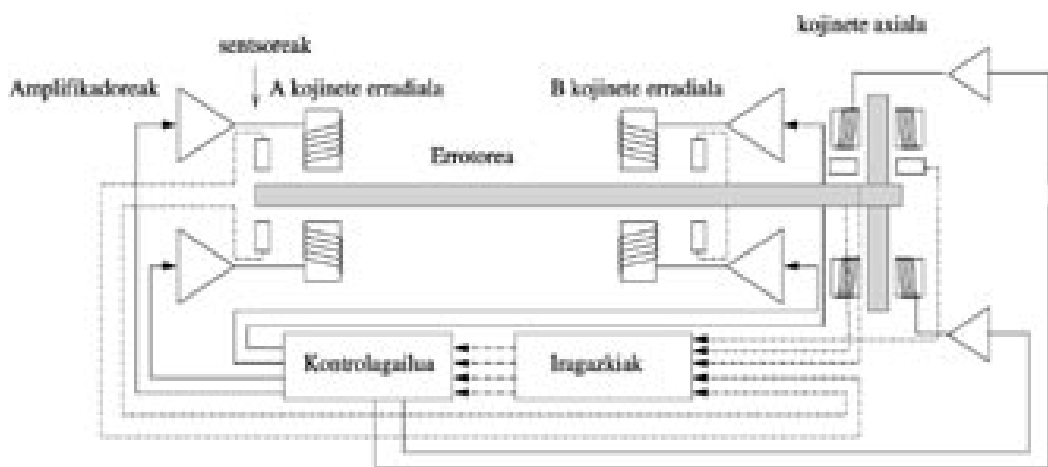
Esan den bezala, industria-aplikazio garrantzitsua da kojinete magnetikoen erabilpena errotazio-abiadura handiak lortzeko unean. Kojinete magnetikoetan oinarritutako sistemetan, material ferromagnetikoz osatutako errotazio-ardatz bat suspentsioan mantendu nahi da indar magnetikoen bitartez; gero, mekanismoren bat ezartzen da ardatza birarazteko, [2,4]. Helburu hau lortzeko, normalean bi kojinete magnetiko erradialek suspentsioan mantentzen dute ardatza, eta beste kojinete axial batek ardatza finkatzen du, 2. irudian ikusten den bezala.

Irudi horren eskema aztertuz, *maglev* kojineteetan oinarritutako sistemen konplexutasuna soma daiteke, eskema nahiko bakundua badago ere.

Alde batetik, eremu magnetikoa lortzeko energia elektrikoa erabiltzen da eta, horrela, indarra sortzen da barraren gainean. Baina kontuan hartu behar da prozesu hau oso ezlineala dela eta fenomeno korapilatsuak agertzen direla tartean: adibidez, eremu magnetikoaren saturazioa, korronteak harilan sor-

tzen duen beroaren eragina edo Eddy korronteak barran sortzen duen eragina. Beste aldetik, korrontea sortzeko behar diren aplikagailuek tarte dinamikoa muga dezakete, beren maiztasun-eremuko banda-zabaleraren arabera. Horrez gain, diseinu mekanikoa oso garrantzi handikoa da, sistemaren portara orokorra mugatzen duten erresonantzia mekanikoak finkatzen baititu.

Amaitzeko, kontrol-sistemaren diseinua aurreko eragile guztiek baldintzatuta dago; horrela, prozesua zaila suertatzen da eta batzuetan kontrol-egitura korapilatsuak behar dira. Izan ere, kontrolgailuen lana funtsezkoa da sistema egonkortzeko.



2. irudia. Sistema lebitatua, kojinete magnetikoen bitartez

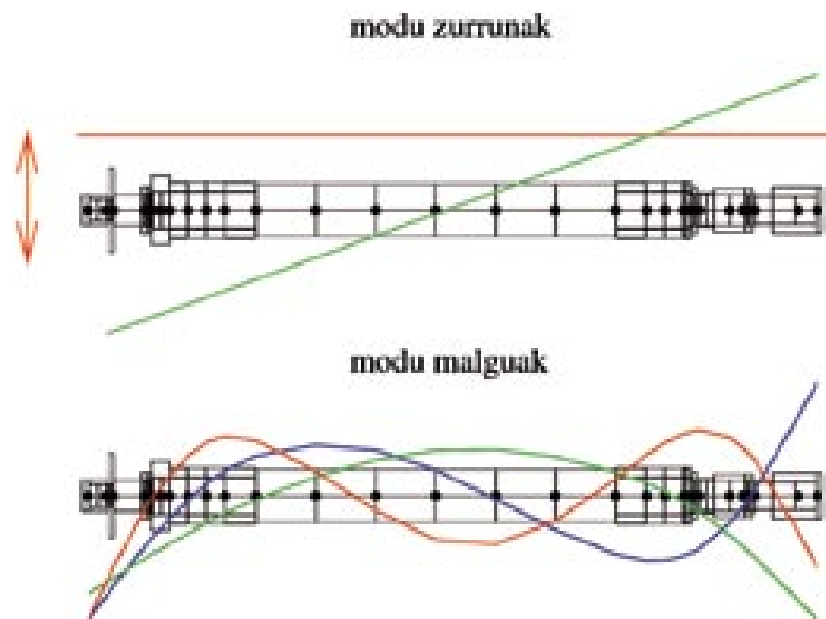
Funtzionamendu osoa hobeto azaltzearen, atalez atal deskribatuko dira elementu garrantzitsuenak: alde mekanikoa, hau da, biraketa-ardatza, kojineteak eta indar magnetikoa, potentzia-sistemak, sentsoreak eta kontrol-sistema, [4,5,6,7].

2.1. Biraketa-ardatza

Sistema hauek abiadura handiko biraketa sortzea dute helburu, eta beraz, biraketa-ardatza elementu ezinbestekoa da. Horren forma geometrikoa eta propietateak erabilpenaren menpe egongo dira beti ere, baina elementu komunak daude. Hasteko, material ferromagnetikoz osatuta egon behar dira, eremu magnetikoak horren gainean eragina izateko. Mekanikaren aldetik kontuz diseinatu behar dira, Eddy korronteen bitartez sortzen diren galera handiak ekiditeko. Korronte hauek, gainazalean sortzen dira ardatza eremu

magnetikoan zehar mugitzean, ardatza material eroalez osatuta baitago. Eddy korranteak gutxitzeko, ardatza kojinetean inguruan xafla estuak erabiliz eraikitzen da, horrela gainazala minimizatzen baita.

Azkenez, oso kontuan hartzekoa da ardatza osatzen duen materialaren izaera malgua. Horren ondorioz, ardatza biraraztean solido zurrun baten dinamika ez ezik, bere dinamika malgua ere aztertu behar da. Batez ere, izaera malgua bibrazio-moduen bitartez ezaugarritzen da. Modu horiek ardatzaren erresonantzia mekanikoak finkatzen dituzte eta, beraz, maiztasun kritikoak ere. Erresonantzia mekanikoek, badute abiadura kritiko jakin bat, bibrazio handiak erakusten dituen. Horretaz gain, erresonantzia mekanikoek badute forma espazial berezi bat, bibrazioa ezaugarritzen duena. 3. irudian ikus daitezke forma horien adibide bat. Bertan, bereziki deigarriak dira modu malguak. Bestalde, biraketa-ardatzaren norabidea z ardatzean badago, modu horiek x eta y planoetan batera agertzen dira, eta berdinak dira simetria mantentzen bada.



3. irudiak. Modu nagusiak ardatz mekanikoan

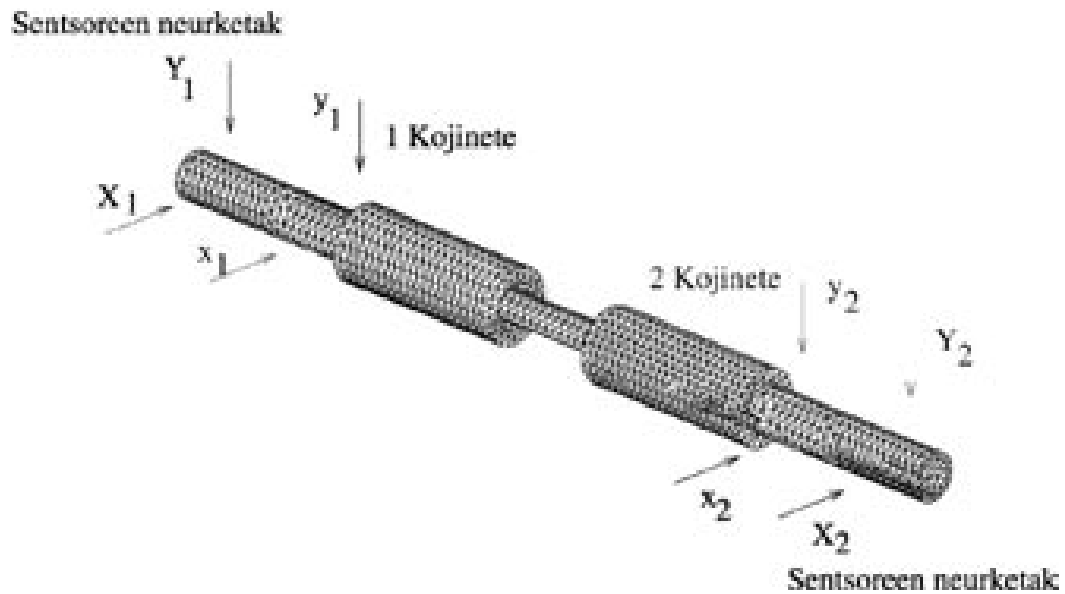
Bestalde, z planoan ere bibrazio-moduak egon badaude, baina egitura normaletan mesprezagarriak dira, barra kokatzeko unean bederen. Halere, z planoan ezin da ahaztu, adibidez, makina-erremintan piezako mekanizatzeko erabiltzen bada ardatza; egoera horretan z planoko bibrazioak garrantzitsuak dira.

Horrez gain, solidoaren dinamika zeharo korapilatzen da analisiari errota-zioaren eragina gehitzen bazaio. Hemen bi fenomeno berri agertzen dira nagusiki: efektu girooskopikoa eta masa-desoreka. Lehenengoa prezesio mugimenduarekin lotuta dago x eta y planoetako dinamikek elkarren artean duten eraginagatik agertzen da. Efektu girooskopikoa erabat lotuta dago ardatzaren geometriarekin eta masa-banaketarekin; barra hainbat eta zabalagoa bada, efektu hori, erlatiboki, zenbat eta garrantzitsuagoa da. Hau da, efektu hori garrantzitsua da barrak z planoan daukan luzera laburra bada, x eta y planoetan daukan luzerarekin alderatuz. Hori gertatzen da, adibidez, maglev sistema diseinatuta badago energia gordetzeko eta, kasu honetan, osatzen den maglev sistemari inertzia-bolantea deritzo. (Flywheel izena hartzen du sistema honek ingelesez).

Bigarren fenomenoari masa-desoreka deritzo. Masa-zentroa biraketa-ardatzaren gainean ez dagoenean agertzen da, bai diseinuagatik eta bai mekanizazioa perfektua ez izateagatik asimetria bat agertzen delako. Masa-desorekagatik, ardatza biraraztean barraren gainean agertzen da indar zentrifugoa, gero eta handiagoa asimetriaren arabera. Hala ere, indar zentrifugoa abiaduraren karratuarekiko proportzionala denez, abiadura handietan oso indar handia gertatzen da, nahiz eta desoreka txikia izan. Adibidez, abiadura 100 Hz-koa bada, sortutako indarra 10000 balioarekin biderkatzen da eta 500 Hz-koa bada, balio hori 250000ekoa da. Horren ondorioz, biraketa-maiztasunarekiko oszilazio sinkrono bat agertzen da biraketa-ardatzean. Ez dago fenomeno hori txantxetan hartzerik. Izan ere, sistema suntsi dezake materialaren erresistentzia gainditzen bada, eta bereziki energia handiak piltzen direnean (adibidez, inertzia-bolantearen kasuan). Masa-desorekak bi-brazio-moduak kitzikatzen dituen elementu nagusia da, beste kanpoko eragina egon ezean, eta horregatik oso kontuan hartzekoa da fenomeno hau.

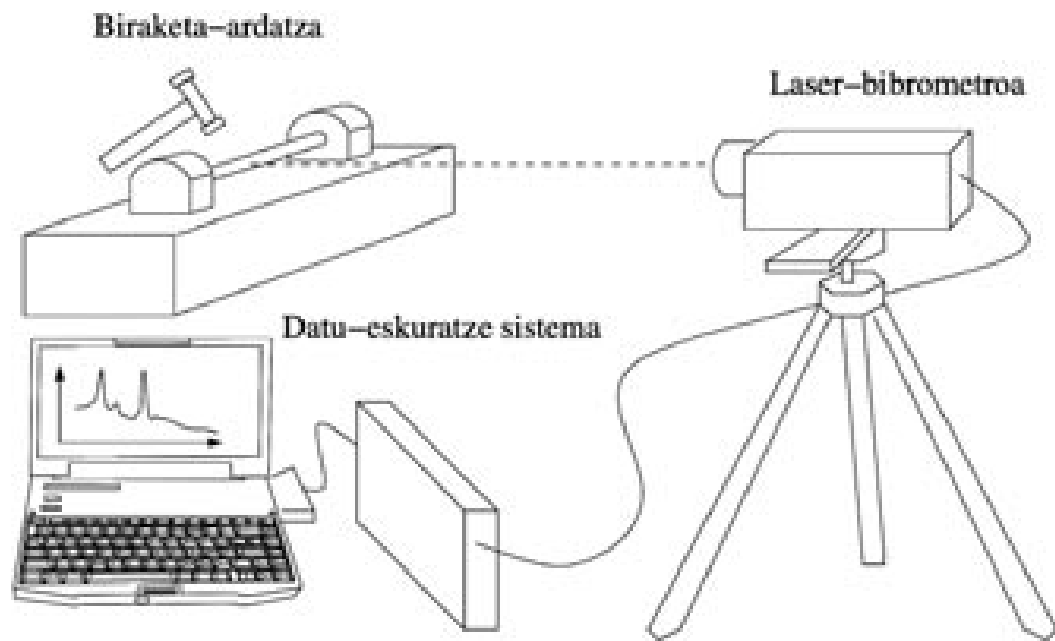
Ikusten denez, alde mekanikoa nahiko korapilatsua da eta tresna egokiak eredutzeko erabili behar dira. Elementu finituen metodoa (FEM) da metodo erabiliena. Horren arabera, aztertu nahi den elementua geometria eta dinamika bereko elementu txikiagoetan zatitzen da. Jatorrizko sistemaren dinamika elementu txiki horien guztien ekarpena gehituz lortzen da. Adibidez, 4. irudian barra baten analisirako ezarri den FEM maila ikusten da eta kojineten kokapena adierazten da.

Irudia ikuskatuz, metodoaren ezaugarri bat ondoriozta daiteke: elementu askoren bitartez gauzatzen da dinamika, eta beraz, datu-prozesamendu korapilatsu bat beharko da; kasu gehienetan, tresna informatiko berezituak ere behar dira. Horrela, FEM teknikaren bidez eredu egokia lor daiteke. Emaiztan kontuan har daiteke bai modu zurrinak eta malguak, bai masa-desoreka eta, behar denean, efektu girooskopikoa ere.



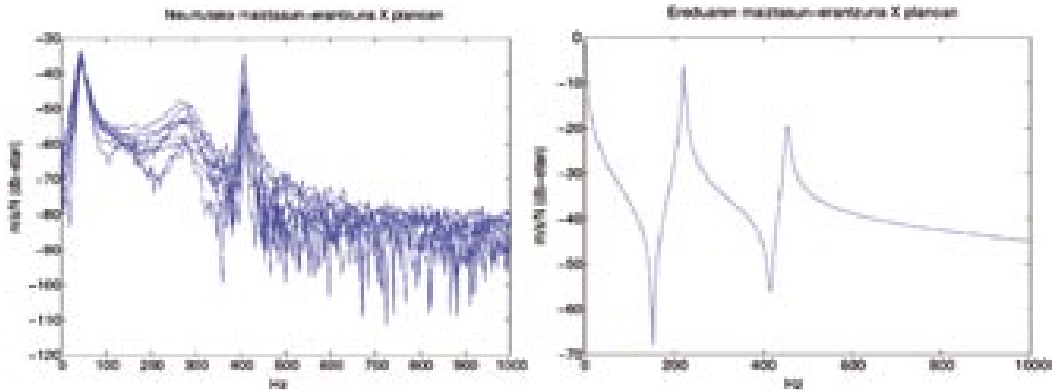
4. irudia. Barra baten FEM analisirako maila

Ereduaren bitartez erresonantziak identifika daitezke, maiztasun-erantzuna deritzon tresna matematikoa erabiliz. Hala ere, eredutze-teknika konplexuena erabilita ere, lortzen dena benetako emaitzekin konparatu behar da. Horretarako 5. irudian erakusten den tresneria erabil daiteke.



5. irudia. Neurketa esperimentalak lortzeko tresneria

Metalezko barra mailu baten bidez mekanikoki kitzikatzen da eta bibrazioak laser-bibrometro baten bitartez neurtzen dira. Benetan erabilgarriak izango diren datuak lortzeko, prozedura askotan errepikatzen da, emaitza estatistikoki egokia izateko. Horrela, 6. irudian maiztasun-erantzun esperimentalak irudikatzen da, emaitza teorikoarekin konparatzeko asmoz.



6. irudia. Maiztasun-erantzun baten adibidea: ezkerrean neurtutakoa, eskuinean eredutik kalkulaturakoa

2.2. Kojinete magnetikoak

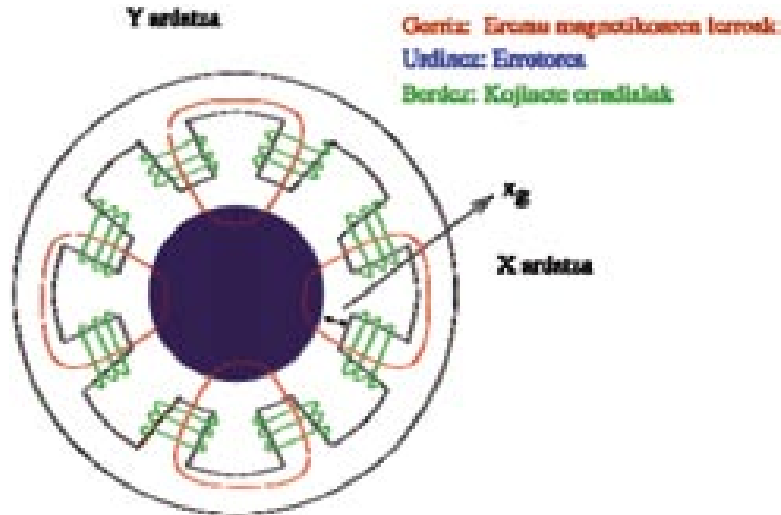
Elementu hauek, lebitazio-indarra sortzen dutenez, funtsezkoak dira eta bere deskribapen zehatza zaila da, elkarrekintza elektromagnetiko eta mekanikoak agertzen direlarik. Egitura zabalduena, diferentziala deritzona, 7. irudian ikus daiteke. Horren bitartez, x eta y planoko dinamiken arteko nahasketarik agertzea ekiditen da egoera estatikoan.

Horrela, efektu batzuk bakunduz, barra ferromagnetikoaren gainean norabide bakoitzean kojineteak sortzen duen indarra hurrengo espresioaren bitartez azaldu daiteke (kasu honetan x planoan):

$$F_i = K \frac{(i_i + i_0)^2}{(x_i - x_g)^2} - K \frac{(i_i - i_0)^2}{(x_i + x_g)^2} \quad i = 1,2 \quad (1)$$

non i azpiindizeak kojineteen bi posizioak zehazten dituen, K elektroimanan eta erabilitako materialaren menpeko konstante bat den, eta i_i eta i_0 hariatik doan korronea eta bias-a diren.

Bestalde, jatorri modura biraketa-ardatza hartuz, x_i neurtzen den barraren desplazamendua da eta, azkenez, x_g x planoan kojinetete eta biraketa-ardatzaren arteko batez besteko distantzia da. Adierazpidea aztertuz, ezlinealtasun maila handia da ezaugarri garrantzitsuena, bai korrontearekiko bai distantziarekiko.



7. irudia. Harilen banaketa kojinetete erradial batean

Deskribapen honetan, sistema magnetikoari dagokion beste arlo bat ere badago tartean: saturazioa. Hau da, sortzen den eremu magnetikoa hariletik doan korrontearekiko proportzionala da, baina material guztiek muga bat dute eta korronte kopuru batetik aurrera gehitzen den eremua askoz txikiagoa da. Ondorioz, beste ezlinealtasun bat gehitzen da sisteman. Normalean, kojineteteak diseinatzen dira efektu hori funtzionamendu tartean garrantzitsua ez izateko.

2.3. Potentzia-sistema

Kojineteteak elikatzeko korronte egokia sortu behar da eta, beraz, anplifikagailuak behar dira. Diseinu-aukerak oso handiak dira, baina sistemaren tarte dinamikoa kontuan hartu behar da beti. Normalean, anplifikadoreen sarrera tentsio bat da eta honek finkatzen du zein den sortu behar den korrontea. Aurreko kasuan bezala, tentsioa eta korrontearen arteko erlazioa mugatuta dago, kasu honetan bi aldeetatik. Lehenengoa, aurreko kasuaren antzekoa da: korronterako muga bat dago. Bigarrena ulertzea pixka bat zailagoa da, eta tarte dinamikoa deritzo. Demagun korrontearen forma sinu-soide bat dela. Orduan, anplifikagailuak maiztasun horri jarraituz lan egin

behar du. Bestalde, nolabait esatearren, onar dezakeen gehienezko maiztasuna mugatuta dago; hots, bere banda-zabalera mugatuta dago. Kojinete magnetikoetan oinarritutako sistema bat diseinatzean bi muga horiek kontuan hartu behar dira eta lan-tartea horietatik ahalik eta urrunen egon behar da. Diseinu-prozesu horretan, argi dago kojineteen ezaugarriak eta potentzia-sistemarenak oso harreman estuetan egongo direla.

2.4. Kontrol-sistema

Sarreran esan bezala, *maglev* teknologiaren erabilpenak, kojinete magnetikoak barne, sistema ezegonkorak sortzen ditu. Ondorioz, sistemaren portaera egokia lortzeko kontrol-sistemak guztiz beharrezkoak dira. Arlo horretan ikerketa lana handia izan da, eta hainbat prozedura daude diseinu egokiak lortzeko. Halere, kontrol-egitura ohikoena PID kontrol ezaguna da. Kasu honetan sistemak abiadura handikoak direnez, kontrolagailua ezartzeko behar den hardwarea ere ondo aukeratu behar da, potentzia-kalkulu handia lortzeko. Normalean, kontrol-sistemak DSP prozesagailuetan ezartzen dira, baina gaur egun hardware berkonfiguragarria indar handia hartzen ari da, batez ere, FPGA deritzona.

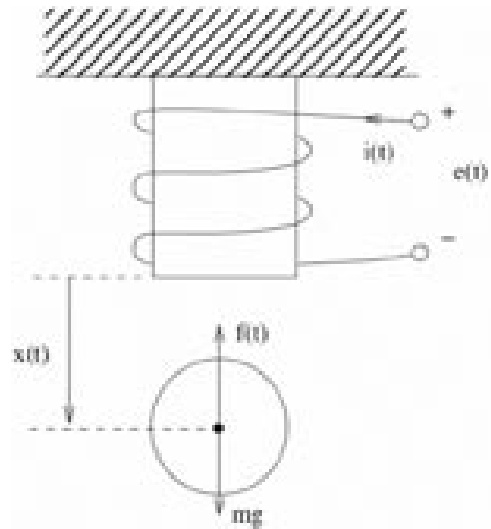
Bere aldetik, kontrol-diseinu osoa korapilatsua suerta daiteke, sistema azkarra, ezlineala eta sarrera eta irteera anitzekoa baita. Halere, oinarritzko prozedura azaltzeko sistema osoaren sinplifikazio bat aurkeztuko da, soilik egoera estatikoa jorratuz. Hau da, efektu girokopikoa eta masa-desoreka ez dira aipatuko.

Bola ferromagnetikoz eta elektroimanez osaturikoa da *maglev* sistema sinpleenatariko bat, 8. irudian adierazten den bezala. Kasu honetan, harilari-korronte bat ezartzean bolaren gainean indar erakarle bat agertzen da, hurrengo adierazpideari jarraituz:

$$f(t) = K_f \frac{i^2(t)}{x^2(t)} \quad (2)$$

Alde mekanikoaren dinamika indar ezlineal honen bidez definituta dago. Newtonen legea ezarriz

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = mg - f(t) = mg - K_f \frac{i^2(t)}{x^2(t)} \quad (3)$$



8. irudia. Oinarrizko sistema lebitatua

Orain oreka-puntu baten inguruan linealizatuz ($x(t) = x_0$, $i(t) = i_0$ eta $f(t) = f_0 = mg$), eta aldagai horren inguruan aldaketa txikiak hartuz ($i(t) = i_0 + \Delta i(t)$, $f(t) = f_0 + \Delta f(t)$ eta $x(t) = x_0 + \Delta x(t)$), indar linealizatua honela idatz daiteke

$$\Delta f(t) = K_i \Delta i(t) - K_x \Delta x(t) \quad (4)$$

non $K_i \frac{2K_f i_0}{x_0^2}$ eta $K_x \frac{2K_f i_0^2}{x_0^3}$ diren. Beraz, (3) ekuazio diferentzian (4) ekuazioa ordezkatzan bada (i_0, x_0, f_0) oreka-puntuaren inguruan, hurrengo espresioa lortuko da:

$$m \frac{d^2 \Delta x(t)}{dt^2} = K_x \Delta x(t) - K_i \Delta i(t) \quad (5)$$

$\Delta x(t)$ eta $\Delta i(t)$ hurrenez hurren bolaren posizioaren aldaketa eta bobinan dagoen korrontearen aldaketa izanik.

Bobinaren dinamika ere gehitu behar da, Kirchoffen legeak ezarriz:

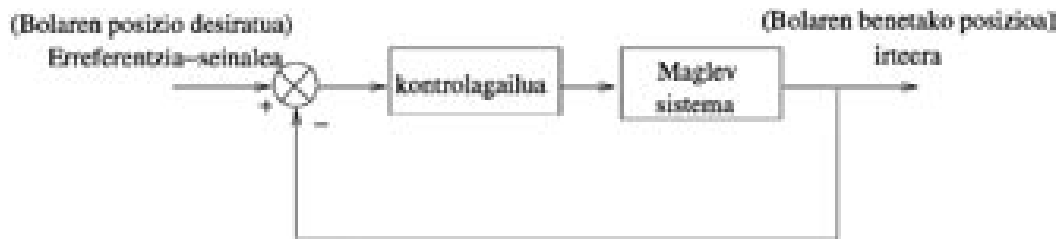
$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

$e(t)$ eta $i(t)$ hurrenez hurren tentsioa eta korrontea izanik.

Kontrol-arloan sistemen deskribapena egiteko, oso ohikoa da Laplace-ren transformazioan oinarritzen den eta transferentzi funtzioa deritzon tresna erabiltzea. Kasu honetan, Laplaceren transformazioa ezarriz eta azpistema elektrikoa eta mekanikoa gehituz, sistema osoa deskribatzen duen transferentzi funtzioa lortzen da:

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} \frac{I(s)}{E(s)} = \frac{-K_i}{ms^2 - K_x} \frac{1}{Ls + R} \quad (7)$$

Sistema bat egonkorra izateko, transferentzi funtzioan izendatzailearen erro guztiak, poloak deritzenak, plano konplexuko ezkerreko planoerdian kokatuta egon behar dira. Hau da, beren alde erreala negatiboa izan behar da. Ondorioz, (7) ekuazioan ikus daitekeenez, sistema hau begizta irekian eze-gonkorra da (hau da, posizioaren berrelikadurarik gabea) eta kontrol-sistema bat gehitu behar da bolaren posizioa egonkortzeko, 9. irudiko eskemari jarraituz. Egitura honi kontrol-begizta itxia deritzo.



9. irudia. Kontrol-sistema berrelikatua

Kasu honetan, oinarritzko kontrola PD kontrolagailua (Proporzional-Deribatiboa) deritzona izan daiteke, hurrengo prozedurari jarraituz ikus daitekeen bezala.

Demagun jarraitu nahi den dinamika (egonkorra) 2. ordenako ekuazio diferentzial baten bidez, honela definitzen dela:

$$m \frac{d^2 \Delta x(t)}{dt^2} = K_x \Delta x(t) - K_i \Delta i(t) = -k \Delta x(t) - k_d \frac{d \Delta x(t)}{dt}$$

Ekuazio horretatik behar den korronea askatuz, hurrengo adierazpidea lortzen da

$$\Delta i(x) = \frac{(k + K_x) \Delta x(t) + k_d \frac{d \Delta x(t)}{dt}}{K_i}$$

Espresio honetan, seinale parte bat posizio-errorearekiko proportzionala da eta beste bat bere deribatuarekiko; hau da, kontrol proportzional-deribatiboa deritzon seinalea da. Laplaceren eremuan, berriro Laplaceren transformazioa ezarriz, behar den kontrolagailuaren transferentzi funtzioa lortzen da:

$$\Delta_{kontrol}(s) = \frac{I(s)}{X(s)} = \frac{k + K_x + K_d s}{K_i}$$

Bolaren orde ardatz bat badugu, egoera berbera errepikatzen da ezberdintasun batzuekin. Hasteko, kojineten batean bi plano hartu behar dira kontuan eta ardatza airean mantentzeko bi kojineten behar dira, gutxienez. Beraz, emaitza sarrera anitzeko eta irteera anitzeko sistema bat da (MIMO), eta aldagaiak akoplatuak daude. Bestalde, barra aldaratzen bada hasierako biraketa-ardatzetik, ezlineatasun gogorak agertuko dira, [8]. Hori guztia buruan, argi dago hemen aurkeztu den analisia sinplifikazio bat dela.

Hala ere, geldiunea aztertuz sistema linealizatu eta gero, eta kanpoko errepresentazioa erabiliz, askotan emaitza erraztu daiteke. Baldintza horietan, x eta y planoetako dinamikak askeak dira eta, plano bakoitzeko, dinamika deskribatzen duen transferentzi matrizea horrela adieraz daiteke kasu praktikoa askotan:

$$G(s) = \begin{pmatrix} A(s) & B(s) \\ B(s) & A(s) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Ekuazio horretan simetria da azpimarragarriena. Simetria hori erabil daiteke, bai sistemaren azterketa, bai diseinua errazteko. Kontrol-diseinua nola erraztu den ulertzeko (8) ekuazioan agertzen den plano bakoitzeko transferentzi matrizea erreferentzi gisa hartzen da eta kontrolagailuaren egitura simetrikoa ere aukeratzen da,

$$G_c(s) = \begin{pmatrix} C(s) & D(s) \\ D(s) & C(s) \end{pmatrix}$$

Baldintza horietan, sistemaren begizta itxiko ekuazio karakteristikoak da:

$$|I + G_c(s)G(s)| = \det \begin{pmatrix} 1 + CA + DB & CB + DA \\ CB + DA & 1 + CA + DB \end{pmatrix} = \det \begin{pmatrix} 1 + A' + DB & B' \\ B' & 1 + A' \end{pmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$(1 + (A' + B'))(1 + (A' - B')) = (1 + (C + D)(A + B))(1 + (C - D)(A - B)) = 0$$

Beraz, hasierako MIMO sistema bi problematan bana daiteke:

$$1 + C_1(A + B) = 0 \quad (10)$$

$$1 + C_2(A - B) = 0 \quad (11)$$

Horrela, problema bakoitza sarrera- eta irteera-bakarrekoa da (SISO), eta asko errazten da prozesua. Azken hori amaitutakoan berreskuratzen da benetako MIMO egitura:

$$\begin{aligned} C + D = C_1 \\ C - D = C_2 \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \frac{C_1 + C_2}{2} = C \\ \frac{C_1 - C_2}{2} = D \end{aligned} \quad (12)$$

Azpimarratu behar da kontrolagailuaren diseinu-prozesu hau askoren artean aukera bat dela. Kojinete magnetikoei buruzko literaturan prozedura anitz aurki daitezke, [9,10].

2.5. Sentsoreak eta iragazkiak

Orokorrean, kontrol-seinale egokia sortzeko barraren posizioa puntu eta plano ezberdinetan neurtu behar da eta lan hori egiteko sentsoreak behar dira. Esparru honetan bi sentsore mota dira ohikoenak, batzuk Hall efektuan oinarritzen dira eta besteak lehen aipatu diren Eddy korronteen sorreran. Sentsoreek ere beren dinamika gehitzen diote sistema osoaren portaerari eta gehienetan kontuan hartu behar dira eredu zehatzak lortzeko.

Hori ez da seinaleen lorpenarekin lotuta dagoen arazo bakarra. Datu-laginak hartzerakoan eta digitalizazio-prozesuan zarata ere sortzen da, normalean goi maiztasunetan. Iragazkiak erabiltzea da horrek sortzen duen kaltea murrizteko prozedura ohikoena, eta ahalik eta eragin txikiena sortzea da helburua. Nolanahi ere, iragazkiek sistema osoaren portaeran ere eragina izaten dutenez, ezinbestekoa da beren dinamika ereduan parte hartzea.

Elementu guztiak gehituz eta (1) ekuazioa linealizatuz, sistema osoaren eredua lor daiteke. Normalean, orden altuko ekuazio-sistemak agertzen dira. Adibidez, *maglev* sistema baten barneko errepresentazioa erabiliz horrela egin da eredua:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_{f_x} \\ \dot{\bar{x}}_{f_y} \\ \dot{\bar{x}}_x \\ \dot{\bar{x}}_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{flex_x} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & A_{flex_y} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & A_{rig_x} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{0}_{4 \times 4} & A_{rig_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_{f_x} \\ \bar{x}_{f_y} \\ \bar{x}_x \\ \bar{x}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{flex_x} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \mathbf{0}_{4 \times 2} & B_{flex_y} \\ B_{rig_x} & \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \mathbf{0}_{4 \times 2} & B_{rig_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x_1} \\ V_{x_2} \\ V_{y_1} \\ V_{y_2} \end{bmatrix} \\
 + \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 2} \\ -e_y & e_x \\ \mathbf{0}_{3 \times 2} \\ e_x & e_y \\ \mathbf{0}_{1 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \cos \omega t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{10 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ g \\ \mathbf{0}_{1 \times 1} \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{flex_x} & \mathbf{0}_{2 \times 4} & C_{rig_x} & \mathbf{0}_{2 \times 4} \\ \mathbf{0}_{2 \times 4} & C_{flex_y} & \mathbf{0}_{2 \times 4} & C_{rig_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_{f_x} \\ \bar{x}_{f_y} \\ \bar{x}_x \\ \bar{x}_y \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Azken ekuazio horietan aipagarri izan daiteke zein den masa-desorekaren eragina ardatza birarazten ari denean. Hori erudian sarrera sinusoidaleak agertuz islatzen da; bertan, anplitudea biraketa-abiaduraren karratuarekiko proportzionala da. Abiadura handituz doanean, argi dago masa-desorekak sortzen duen indar zentrifugoa oso garrantzitsua bihurtzen dela, nahiz eta desoreka txikia izan (hau da, nahiz eta $e_{x,y}$ parametroak txikiak izan). Goian esan denez, egoera hau sistemaren berezko erresonantzia mekanikoekin lotzen da. Eta erresonantzia horiek, sistemaren malgutasunarekin lotuta daude.

Adibidez, (13) ekuazioaren kasuan, erresonantziak *flex* azpiindizea duten matrizeetan biltzen dira. Horien garrantzia ikus daiteke, esaterako, 6. irudiko maiztasun-erantzunean. Erresonantzia-maiztasun hauen inguruan, argi dago sistema kontuz erabili behar dela. Ikerketa ugari egin dira eta egiten ari dira sistema kalteku gabe modu horien abiadura kritikoak gainditzeko. Hau da, biraketa-abiadurak modu horiei dagokien maiztasuna gainditzeko, ahalik eta arazo gutxienekin.

3. APLIKAZIOAK ETA ERRONKAK

Kojinete magnetikoen abantailak erakusten dituzte beste teknologien aurrean; orokorrean, *maglev* sistemetan nabarmentzen dira abantaila horiek. Ukipenik gabeko biraketa-ardatzak lortuz, marruskadura mekanikoa ekiditen da eta barraren energia ez da galtzen beroa sortuz. Honekin energia horren kontserbazioa irabazten da eta, horrez gain, teknologia honetan oinarritutako sistemak ez dira hoztu behar (orokorrean). Ondorioz lortzen den garbitasuna kasu askotan oso abantailatsua da, batez ere bai lubrikazioa bai hotza sortzeko jariakinak saihestu behar direnean. Beste aldetik, beren izaera aktiboa ere oso garrantzitsua izan daiteke, adibidez, bibrazioen kontrola garatzeko.

Biraketa-abiadura handia da, eta horixe da kojinete magnetikoak erabiltzeko arrazoi nagusia. Biraketa-abiadura handia lortzeko beste teknologia batzuk ere badaude, kojinete keramikoak tartean. Hala ere, azken horiek arazo bat daukate, erraz apurtzen baitira. Horren ondorioz, kojinete keramikoaren mantenua baldintzatua gertatzen da eta kostuak gora egiten du.

Alabaina, *maglev* sistemek desabantailak ere badauzkate. Horien artean bere izaera ezegonkorra eta teknologiaren aldetik daukaten ezarpen korapilatsua dira azpimagarrienak. Horrekin batera kostua dago, jakina, baina hala ere askotan abantailak garrantzitsuak direnez aplikazioak ugariak dira, [4,5,6,11,12,13,14,15,16,17,18].

3.1. Aplikazioak

Kojinete magnetikoak erabiltzen dira bai sistema txikietan, MEMS (MicroElectroMechanical Systems), bai sistema handietan. Hemen deigarriak diren aplikazio batzuk aipatuko dira:

- Turbomakineria. Hori izan zen merkaturatutako lehenengo aplikazioa. Gaur egun, esaterako, Txinan 10MW-ko erreaktore nuklearrak garatzen ari dira, beren turbomakineriaren errotoak *maglev* teknologian oinarrituta, [11].
- Energia gordetzeko. Marruskadurarik ezak energia mekanikoaren galera ekiditen du. Horrela, energiaren pilaketa lortzeko masa handiko ardatzak diseinatu dira. Sistema horiei inertzia-bolanteak deritze eta gero eta ohikoak dira. Beren lehenengoetariko aplikazioa espazioan aurkitu zen, eguzkitik jasotzen zen energia gordetzeko. Espazioan eguzkia oso energia-iturri interesgarria da, baina ezin da etengabe lortu eta kojinete magnetikoetan oinarritutako inertzia-bolanteak osagarri oso egokiak dira energia pilatzeko, [12].
- Makina-erreminta. Piezak mekanizatzeko gomendagarria da buruaren biraketa-abiadura handia erabiltzea, eta garbitasuna komenigarria da. Horregatik, azken urteetan kojinete magnetikoen erabilpena bul-tzatzen ari dira arlo horretan, [13,14].
- Bihotz artifizialak. Kojinete magnetikoak potentzia handiko sistemetan ez ezik, potentzia txikiko sistemetan ere erabiltzen dira. Bihotz artifizialak lortzeko diseinu hibridoetan oinarritutako ponpak erabiltzen dira. Kojinete magnetikoei hibridoak deritze, iman naturalak eta elektroimanak batera erabiltzen badira, [16].

- Xehatzaile doiak (ingelesez, Chopper). Instalazio zientifiko handietan, sinkrotroi eta azeleragailuetan, energia handiko partikula-zurrustak sortzen dira hainbat aplikaziotarako. Horietako batzuetan zurrustak paketetan moztu behar dira, era zehatzean. Horretarako, abiadura handian biratzen diren diskoak erabiltzen dira; diskoek energia finko bat pasatzen uzteko zulo egokia daukate, [17,18].

Hemen agertzen diren aplikazioak adibide batzuk besterik ez dira, beste askotan ere erabiltzen baitira, esaterako, konpresoreetan, astingailuak ezartzeko hozte-sistemetan, huts-ponpetan, nabegazioan laguntzeko egonkortze-sistemetan eta are gehiagotan ere.

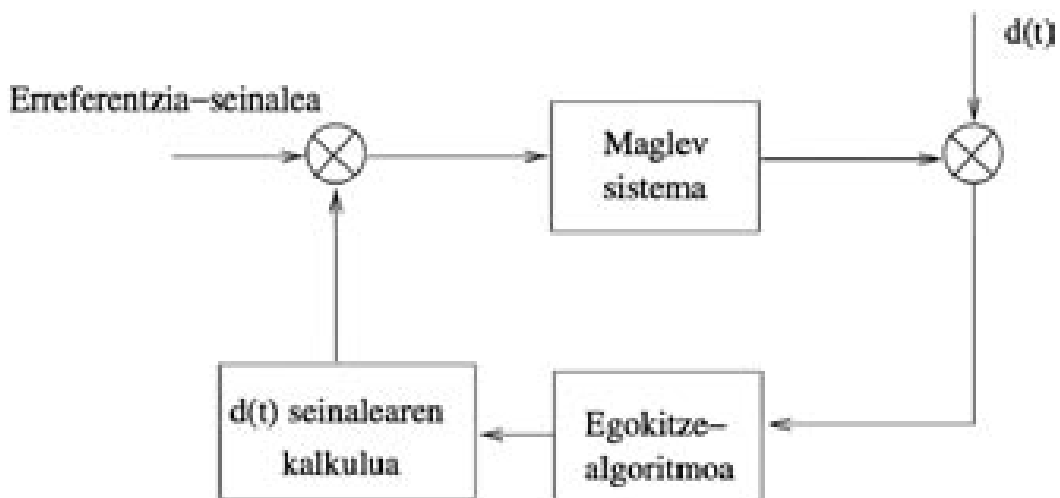
Aplikazioak aztertzean berehala konturatuko gara kojineten magnetikoak bai tamainan, bai potentzian, bai aplikazio-baldintzetan oso ezberdinak izan daitezkeela. Beraz, hauen inguruan ezaugarri ugari aztertu beharko dira eta hobekuntzak arlo askotan egin daitezke. Ikerketa-esparruak honen isla dira.

3.2. Ikerketa

Kojinete magnetikoen aplikazioa interesgarria dela-eta, ikerketa lerro asko horien inguruan daude lanean, [14,19,20,21,22,23,24,25]. Bi urtean behin antolatzen den nazioarteko biltzarra da horren adierazlea. International symposium on magnetic bearings ISMB izena du eta kojinete magnetikoen inguruko ikerketaren inguruan antolatzen da. Ikerketa lerro horiek ugari dira eta hemen horietako batzuk azpimarratuko dira:

- Material eta topologia berriak. Kojineteen ezaugarriak hobetzeko material magnetiko berriak (adibidez, supereroaleak) eta kojinete hibridoak proposatzen eta aztertzen dira. Honekin batera, 7. irudiko topologiarekin alderatuta beste topologiak ere aztergai daude, esaterako hiru harilen erabilpena.
- Abiadura kritikoak gainditzea. Erresonantzia mekanikoak beti agertuko dira, materiala eta diseinuaren arabera. Ikerketa lanetan abiadura kritiko horiek gainditu ahal izateko aukerari arreta handia eman zaio; horrela, biraketa-abiadura are handiagoak lortzeko bidea irekitzen ari dira. Bi ikuspuntu daude: alde batetik diseinu mekanikoaren hobekuntza (adibidez, masa-desoreka gutxituz) eta beste aldetik, kontrol-diseinuaren erabilpena erresonantziak indargetzeko, kojineteen izaera aktiboaz baliatuz. Hurrengo atalen batean emango dira azken honen xehetasun gehiago.

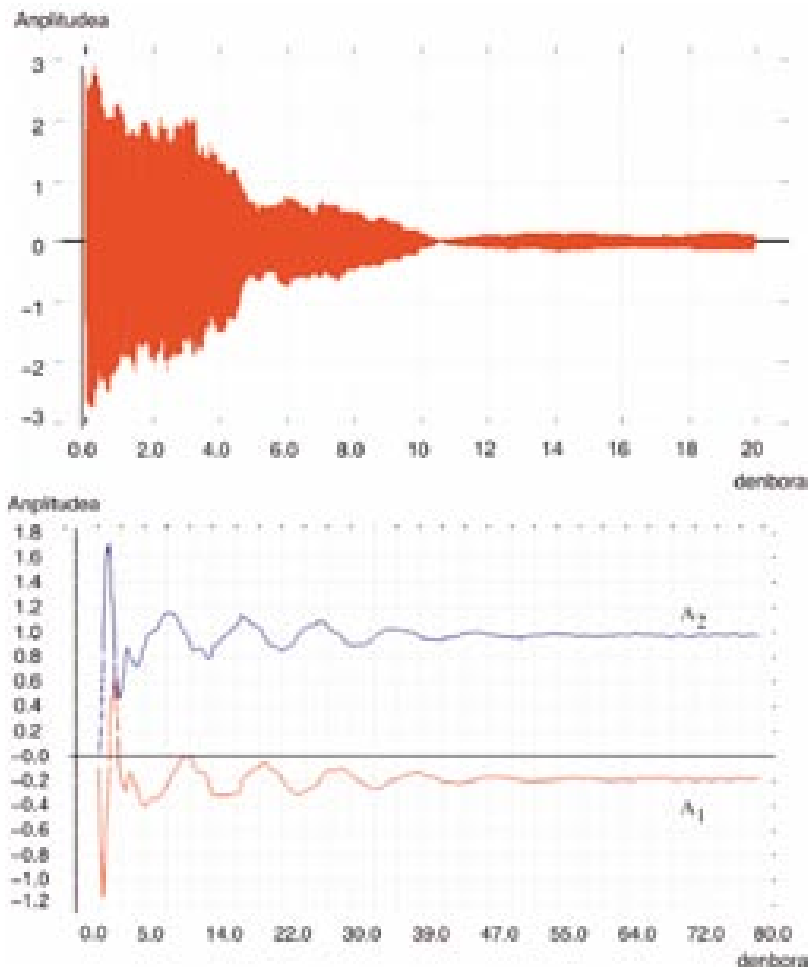
- Sentsore berriak eta autosentsoreak. Sistema berrelikatu guztietan bezala erantzuna neurtzea funtsezkoa da portaera egokia izan dadin. Beraz, oso komenigarria da sentsoreak hobetzea alde batetik eta merkatzea bestetik. Bereziki, ikerketa lerro anitzetan sentsoreak ekiditeko lan egiten ari dira.
- Automotorrak. Aurrekoaren harira, hemen biraketa-indarra egiten duen motorra lebitatutako biraketa-ardatzean bertan kokatuta dago, egitura orokorra sinpleagoa delarik. Diseinu mota hau oso erabilgarria da sistema txikietan.
- Kontsumoa gutxitzea zero potentziako sistemetan. Energia gordetzeko sistemetan garrantzitsua da potentzia ahalik eta gutxien xahutztea. Horregatik, erabilgarria da bias korronteak kojineteetatik kentzea. Horrela, baina, ezlinealtasun arazoak handiagotzen dira eta ondo kudeatu behar den egoera sortzen da.
- Kontrol-algoritmoak. Kontrola funtsezkoa da, baina teknika bideragarri asko daude. Gaur egun metodo hoberenaren bila dabilta, egonkortasuna, sendotasuna eta bestelako ezaugarriak gordetzeko. Esanenez, abiadura kritikoak gainditzea bereziki garrantzitsua da. Esaterako, arazo horren inguruan garatzen den teknika bat bibrazioen kontrako egokitze-kontrola da (ikus 10. irudia). Teknika horren oinarria perturbazioak azaltzen duen maiztasun bera eta kontrako fasea dituen seinale bat sortzean datza. Seinale horren adierazpidea hau da: $d(t) = A_d \sin(\Omega t + \varphi_d) = A_1 \sin(\Omega t) + A_2 \cos(\Omega t)$. Perturbazio-seinalea ezagutzen ezenez, parametro egokiak (A_1 eta A_2) doitu behar



10. irudia. Bibrazioak gutxitzeko kontrol moldakorraren oinarrizko eskema

dira era moldakorrean bibrazioa ezeztatzeko, 11. irudian ikusten den bezala. Esan behar da emaitza hauek lortzeko, sistema bere oreka-posizioaren inguruan egonkortuta egon behar dela alde aurretik. Beraz, bi kontrol mota batera egongo lirateke, lehengoa egonkortasuna bermatzeko eta bigarrena, bibrazioak gutxitzeko.

- Analisi eta kontrol ezlineala. Kojinete magnetikoen bidez osatzen diren sistemak guztiz ezlinealak dira eta hemen aipatu ez diren bigarren ordeneko fenomeno ezlineal asko ere agertzen dira tartean, histeresia esaterako. Arazo hauen inguruan asko ikertzen ari da. Sistemaren portaera zehatza hobetu eta ezagutza hobea nahi da eta horretarako, ahalik eta diseinu aurreratuen eta ahalik eta kostu murrizten erdies- teko ahaleginetan ari dira.

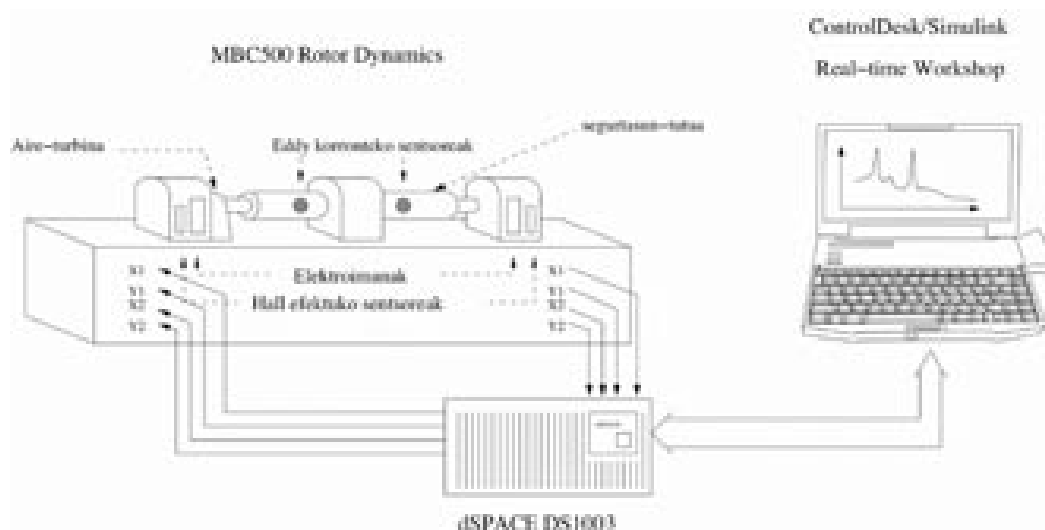


11. irudia. Bibrazioaren ezeztapena erabiliz egokitze-algoritmo bat (goian) eta parametroen bilakaera (behean)

Kasu gehienetan kojinete magnetikoen inguruan egiten den ikerketa aplikatua denez, ikerketa-taldeek normalean prototipoen bitartez lan egiten dute. Hau da, lortzen diren emaitza teorikoak era esperimentalean frogatzen dira. Adibidez, 12. irudian laborategiko prototipo bat agertzen da, hiru elementu nagusi ezberdinduz. Nagusia, kojinete magnetikoen bidez ardatza suspentsioan mantentzen duen MBC500 Rotor Dynamics sistema da. Sistema hori komunikatuta dago kontrol-sistema batekin; kontrol-sistema, berriz, dSPACE enpresak egindako DSP DS1003 txartelean oinarritzen da.

Azkenez, kontrol-sistema konfiguratzeko eta sistema osoa ikuskatzeko ordenagailu bat dago, Matlab/Simulink ingurunean lanean. Azpimarratu behar da kontrol-algoritmoak exekutatzeko ezinbestekoa dela denbora-errealako sistema bat eta, denbora-konstanteak kontuan hartuz, potentzia-kalkulua handia dela.

Amaitzeko, esan daiteke Euskal Herrian badaudela hauen inguruan talde batzuk lanean buru-belarri. Adibidez, EHUko GAUDEE ikerketa taldeak, kontrol-egitura sendoetan eta abiadura kritikoak gainditzeko kontrol-diseinuan dihardu Zientzia eta Teknologia Fakultatean; Eibarren, Tekniker zentro teknologikoko lan lerroen artean kojinete magnetikoak daude, era berezian makina-erremintan aplikatzeko helburuarekin. Azkenez, Donostiako CEITen energia gordetzeko sistemak garatzen ari dira.



12. irudia. Froga esperimentalak egiteko prototipo baten adibidea

4. ONDORIOAK

Kojinete magnetikoetan oinarritutako biraketa-sistemak oso interesgarriak dira, beren ezaugarriei esker. Abantailen artean, esan daiteke biraketa-abiadura handiak lor daitezkeela, marruskadurarik ezak lagunduta. Horrela, energia mekanikoa ez da galtzen beroa sortuz. Hala ere, bere diseinuak korapilatsuak dira, hainbat diziplinaren arteko lana egin behar delako. Horien artean, kontrol-disenuak bere garrantzia badu, oinarritzko egonkortasuna lortzeko, portaera sendoagoa izateko edo bibrazioak ekiditeko.

Nahiz eta aplikazioak gero eta ugariagoak izan, argi dago sistema hauek ez direla guztiz ondo ezagutzen eta etorkizunean ikerketa gehiago egin behar dela, dauden aplikazioak hobetzeko eta aplikazio berriak garatzeko. Ildo honetan, funtsezkoa izan daiteke sistema hauen portaera hobetzeko material berrien aplikazioa. Beste lan-esparrua potentzia-sistemen diseinu egokia lortzea da, energia-galerak are gehiago ekiditeko eta indar magnetikoa hobeto kudeatzeko. Azkenez, kontrol-arloan aurreratzeko bidea dago, hasteko kontrol-digitalean oinarritutako sistemak gero eta ahaltuagoak direlako eta, beste aldetik, kontrol-estrategia berriak inplementatzeko garapen-sistemek gero eta erraztasun handiagoak eskaintzen dituztelako. Horrela, *maglev* sistemen etorkizuna oparoa izango dela auresan daiteke.

ERREFERENTZIAK

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing.
- [3] M.C. MARION-PERA and J.P. YONNET, «Study of permanent magnet arrangements for superconducting passive bearings», IEEE Transactions on Magnetics, 30(6), 1994, pp. 4743-4745.
- [4] SCHWEIZER, G., BLEULER, H., & TRAXLER, A. «Active Magnetic Bearings: Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings». Zürich: Hochschulverlag AG an der ETH, 1994.
- [5] D. CHILDS, «Turbomachinery Rotordynamics: Phenomena, Modeling & Analysis», Jon Wiley & Sons, New York (USA), 1993.
- [6] KASARDA M.E.F, «An Overview of Active Magnetic Bearing Technology and Applications», The Shock and Vibration Digest, v. 32, 2000, pp. 91–99.
- [7] I. ARREDONDO, J. JUGO, S. ALONSO-QUESADA, I. LIZARRAGA, V. ETXEBARRIA (2008), «Modelización, análisis y control de sistemas de cojinetes magnéticos activos», RIAI Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, argitaratzen.

- [8] JUGO, J., I. Arredondo and V. Etxebarria (2005). «Analysis and control design of MIMO systems based on symmetry properties». Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control and 2005 European Control Conference, Sevilla (Spainia).
- [9] M.J. JANGA, C.L. CHENB, Y.M. TSAOC, «Sliding mode control for active magnetic bearing system with flexible rotor», *Journal of the Franklin Institute*, 342, 2005, pp. 401–419.
- [10] R. JASTRZEBSKI, «Design and implementation of FPGA-based LQ control of active magnetic bearings». Phd thesis 2007.
- [11] Y. SUYUAN, Y. GUOJUN, S. LEI and X. YANG, «Application and Research of the Active Magnetic Bearing in the Nuclear Power Plant of High Temperature Reactor», Proceedings of the 10th International Symposium on Magnetic Bearings, Martigny (Switzerland), 2006.
- [12] T.P. DEVER, A. B. PALAZZOLO, E. M. THOMAS and R. H. JANSEN, «Commercialization of flywheel energy storage technology on the international space station», Proceedings of 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Savannah (USA), 2001.
- [13] C.R. KNOSPE, «Active magnetic bearings for machining applications», *Control Engineering Practice*, v. 15, 2007, pp. 307–313.
- [14] M.R. MOVAHHEDY and P. MOSADDEGH, «Prediction of chatter in high speed milling including gyroscopic effects», *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 46, 2006, pp. 996–1001.
- [15] T. HU, Z. LIN and P. E. ALLAIRE, «Reducing Power Loss in Magnetic Bearings by Optimizing Current Allocation», *IEEE Trans. on Magnetics*, v. 40, 2004, pp. 1625–1635.
- [16] M.D. NOH, J.F. ANTAKI, M. RICCI, J. GARDINER, D. PADEN, J. WU, E. PREM, H. BOROVETZ, B.E. PADEN. «Magnetic Design for the PediaFlow Ventricular Assist Device», *Artificial Organs*, 32, 2008, pp. 127-135(9).
- [17] A. ZIRKEL, S. ROTH, W. SCHNEIDER, J. NEUHAUS, W. PETRY. «The time-of-flight spectrometer with cold neutrons at the FRM-II», *Physica B* 276-278 (2000) 120-121.
- [18] <http://www.fz-juelich.de/zat/Chopperen/>.
- [19] K. NONAMI and Z. LIU, «Adaptive Unbalance Vibration Control of Magnetic Bearing System Using Frequency Estimation for Multiple Periodic Disturbances with Noise», *1999 IEEE Conf. Control Applications*, Hawaii, USA, 1999, pp. 576-581.
- [20] A. LANZON and P. TSIOTRAS, «Robust Control of Energy Momentum Wheels Supported on Active Magnetic Bearings using Hinf Loop-Shaping and mu-Synthesis», Proceedings of 15th Triennial World Congress, Barcelona (Spain), 2002.
- [21] R.C. WAGNER, D.R. BOYLE and K. DECKER, «Evaluation and Improvement of Eddy Current Position Sensors in Magnetically Suspended Flywheel Systems», Proceedings of 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Washington D.C (USA), 2002.

- [22] H.J. AHN and D.C. HAN, «System Modeling of an AMB Spindle: Part I Modeling and Validation for Robust Control», *KSME International Journal*, v. 17, 2003, pp. 1844–1854.
- [23] J. SHI, R. ZMOOD and L. QIN, «Synchronous Disturbance Attenuation in Magnetic Bearing Systems Using Adaptive Compensating Signals», *Control Engineering Practice*, Vol. 12, 2004, pp. 283-290.
- [24] J. JUGO, I. LIZARRAGA and I. ARREDONDO, «Nonlinear analysis of an AMB system using harmonic domain LTV models», *Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications*, Munich (Germany), 2006.
- [25] J. JUGO and I. ARREDONDO, «Adaptive Control for Attenuating Vibrations using Nonuniform sampling», *9th IFAC Workshop Adaptation and learning in Control and Signal Processing (ALCOSP'07)*, St. Petersburg, Russia, 2007.