



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

III. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2019ko maiatzaren 27, 28 eta 29
Baiona, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

ZIENTZIAK ETA NATURA ZIENTZIAK

Mikrofonien monitorizazio eta
kontrola RF kabitateetan

*Ander Elejaga, Josu Jugo
eta Inari Badillo*

138-144 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iii.05.19>



Mikrofonien monitorizazio eta kontrola RF kabiteteetan

Elejaga, Ander¹; Jugo, Josu¹, Badillo, Inari¹

IZPILab, Elektrizitatea eta Elektronika saila, UPV/EHU

aelejaga001@ehu.eus

Laburpena

IZPILAB, partikula azeleragailuen ikerketa eta garapena egiten duen EHU-ko laborategia da. Bertan dagoen Maila Baxuko Irrati Maiztasun (ingelesez Low Level Radio Frequency, LLRF) sistema batean oinarrituta, irrati maiztasun (ingelesez radio frequency, RF) kabiteteetan ematen den mikrofonien ondoriozko desintonizazioaren monitorizazio eta kontrola egiteko prototipo funtzional bat garatu da. Prozesu horretan, sistemaren kabitete erresonantearen identifikazio mekanikoa egin ondoren, bi erresonantzia-modu nabarmen aurkitu dira, 305 eta 458 Hz-etan, nagusiena lehenengo hori izanda. Halaber, 305 Hz-eko modu mekanikoa kitzikatzen duen mikrofonia kontrolatzeko Adaptive Feedforward (AFF) kontrolagailu bat inplementatu da sortutako prototipoan. Modu horretan, maiztasun horretako perturbazio mekanikoak %95a txikitzea lortu da.

Hitz gakoak: Mikrofoniak, kontrol aktiboa, LLRF, IM kabitetea

Abstract

In this work a Low Level Radio frequency (LLRF) system is used as the foundation of a new functional prototype to control and monitorize the microphonic detuning of a RF cavity. For that matter, a mechanical identification of the RF cavity has been done, founding two relevant resonant modes at 305 and 458 Hz. For testing purposes, an Adaptive Feed forward (AFF) controller has been integrated on the developed prototype, achieving a 95% reduction of the 305 Hz microphonic detuning.

Keywords: Microphonics, active control, LLRF, RF cavity

1. Sarrera eta motibazioa

Partikula azeleragailuetan, kabitete erresonanteak erabiltzen dira partikulak paketatzeko, bideratzeko eta azeleratzeko (Humphries, 2012). Gailu horiek, kabitete eroale hutsak dira, zeinetan maiztasun jakinako uhin elektromagnetikoak (EM) injektatuz, partikula kargatuen azeleraziorako eremu EM egokiak lortzen diren. Horien funtzionamendua, erresonantzia EM fenomeno fisikoan oinarritzen da. Modu honetan, injektatzen den uhin EM-aren uhin luzeera (edo maiztasuna) kabitetearen geometriarekin bateragarria denean, horren barneko hormen aurka etengabe islatuko da eta, horrela, uhin geldikor bat sortuko du. Uhin horrek, aldi berean, partikulak azeleratzeko erabiliko diren eremu EM-ak sortuko ditu. Ondorioz, kabiteteak maiztasun jakin batzuetako uhin EM-ak bakarrik onartuko ditu (erresonantzia-maiztasunak), horren geometriaren guztiz menpekoak direnak. Gainera, gailuaren barnean sortutako eremu EM-en banaketa, kabitetea kitzikatzeko erabiltzen den erresonantzia-maiztasunaren araberakoa da. Erresonantzia konfigurazio horiei kabitetearen erresonantzia-moduak deritze. Horrela, gaur egungo azeleragailuetan kabitete erresonante pseudo-zilindrikoak erabiltzen dira, horien TM_{010} erresonantzia-moduak azeleraziorako eremu EM optimoak sortzen baititu. Gailu horien erresonantzia-maiztasun nominala (TM_{010} moduaren erresonantzia-maiztasuna) kabitetearen diseinuaren araberakoa da, baina beti irrati maiztasun (Radio frequency ingelesez, RF) tartean aurkitzen da, 3Hz-etik 300GHz-era.

Azeleragailu bat lanean dagoenean, haren RF kabiteteek jasan ditzakete hainbat iturrik sortutako perturbazio mekanikoak: huts ponpek sortutako bibrazioak, hozte sistemen helio likidoan sortzen diren burbuilen ondoriozko bibrazioak, etab. (Powers, 2015). Maiztasun baxuko perturbazio mekaniko horiei mikrofoniak deritze. Gaur egungo kabitete supereroaleek 10^9 ordenako kalitate faktorea izan dezakete (Padamsee, 2009) eta beraz, haien funtzionamendu banda zabalera oso estua da. Hori dela eta, aipatutako perturbazio mekanikoek kabitetearen geometrian sortutako deformazioen ondorioz, gailuaren erresonantzia-maiztasuna aldatu egiten da. Injektatutako RF

seinalearen maiztasuna mantendu egiten denez, honek sortutako erresonantzia ez da optimoa izango eta azelerazio eremuek gradiente txikiagoa izango dute, baita kabitateak kontsumo energetiko handiagoa ere.

Fenomeno hori zuzendu ahal izateko, azeleragailuetan mikrofonikiak kontrolatzeko sistema espezifikoak erabilteza beharrezkoa suertatzen da. Horien garapen prozesuan zehar eta, azeleragailu errealean inplementatu baino lehen, derrigorrezkoa da simulazio eta froga etapa bat, non kontrolagailuaren funtzionamendu egokia azterten den sistema isolatu batean. Gaur egun, etapa hauek Hardware-In-the-Loop sistemak erabiliz betetzen dira, horrek dakartzan mugekin. Lan honen helburu nagusia, prototipo funtzional bat garatzea da. Hortan, RF kabitate erreal bat erabiliz, hainbat kontrol algoritmoen funtzionamendua aztertzeko aukera egongo da.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Mikrofonien kontrolari dagokionez, bi planteamendu orokor erabiltzen dira gaur egungo partikula azeleragailuetan: kontrol pasiboa eta kontrol aktiboa.

Alde batetik, kontrol pasiboa kabitate erresonanteen egitura aztertzean datza, berorren puntu ahulak titaniozko eraztun zurruneekin indartzeko (Posen eta Liepe, 2011)(Liepe, 2015).

Bestetik, kontrol aktiboa dago. Sistema horietan, hainbat eragingailu mekaniko erabiliz, kabitatearen geometria modu kontrolatu batean eraldatzen da mikrofoniek sortutako deformazioei kontra egiteko.

Mota horietako kontrol sistemetan bi algoritmo mota erabiltzen dira nagusiki, kontrol moldagarriak (Kandil *et al.*, 2005; Scheinker *et al.*, 2014) eta perturbazioen kontrol aktiboa (Neumann *et al.*, 2010; Vincent *et al.*, 2011; Geng, 2017; Rybaniec *et al.*, 2016); biak feedforward kontrol-akzio batean oinarritzen dira. Alde batetik, kontrol moldagarriekin mikrofonien ondoriozko desintonizazioa 7,4-ko faktore baten txikitzea lortu da (31 Hz-etik 4,2 Hz-etara) (Kandil *et al.*, 2005). Aldiz, perturbazioen kontrol aktiboa erabiliz, 7-ko faktore baten txikitu dira aipatutako mikrofonikiak.

Teknika horien zailtasun nagusia eragile mekaniko egokien aukeraketan datza. Izan ere, erantzun ez-lineala dute, baita histeresi zikloa ere (Berek *et al.*, 2015). Gaur egun, bi eragile mota desberdin erabiltzen dira; pausoz-pausoko motorrak eta piezoelektrikoak. Azkeneko horiek emaitza hoberenak lortu dituzte.

Gainera, sistema horiek ezin daitezke azeleragailu errealean ganean zuzenki garatu, baizik eta sistema isolatuak (test-bench-ak) behar dira, non kontrol sistemaren eta kontrol algoritmoen funtzionamendua bermatu ahal den. Froga horiek egiteko, kabitate erresonante supereroale isolatuak behar dira, baina horien erabilgarritasun-egoera oso murriztua denez (gehienak azeleradoreetan inplementatuta daude), sistema aktiboaren garapen prozesua asko tratatzen da.

Modu honetan, lan honen helburu nagusia da RF kabitate batek jasandako mikrofonien ondoriozko desintonizazioa monitorizatzeko eta kontrolatzeko aukera emango duen prototipo funtzional bat diseinatzea eta garatzea. Halaber, perturbazio mekaniko horien eta kabitateak sumatutako desintonizazioaren arteko erlazioa aztertzeko baliagarria izango da. Modu horretan, prototipoa bukatuta dagoenean Adaptive Feedforward (AFF) kontrol algoritmo bat inplementatuko da bertan mikrofonien ondoriozko desintonizazioa kontrolatzeko eta prototipoaren baliagarritasuna bermatzeko.

3. Mikrofonien monitorizazio eta kontrolerako prototipoaren diseinu eta garapena

Aurretik aipatu den bezala, lan honetan garatutako prototipoa EHU-ko partikula azeleragailuen laborategian (IZPI-LAB) dagoen LLRF sistema (Badillo, 2015) batean oinarritzen da. Sistema horren zeregin nagusia RF kabitatean injektatzen den seinalearen anplitude eta fasea kontrolatzea da, gailuaren barnean azelerazio eremu egokia sortu ahal izateko.

LLRF sistemetan ohikoa den bezala, sistema horretan ere RF seinalea I eta Q osagaietan demodulatu egiten da, gero horiek kontrolatu ahal izateko. Osagaia horien bitartez, RF seinalearen fase eta anplitudearen informazioa era erabilgarriago batean lortu daiteke, izan ere, RF seinalearen maiztasuna konstantea den bitartean, I/Q osagaiak konstanteak izango baitira (2 eta 3 ekuazioak).

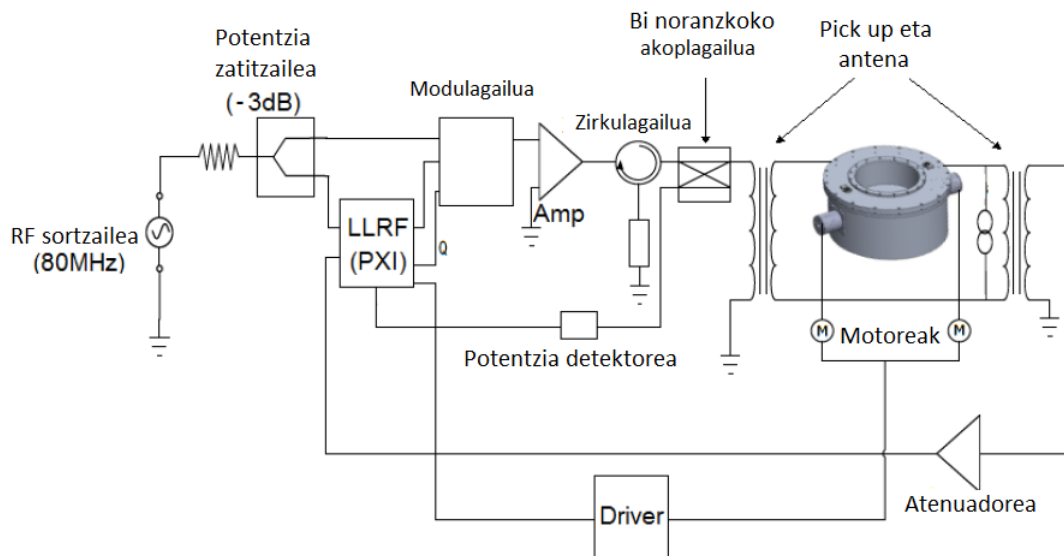
$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$I = A\cos(\varphi) \quad (2)$$

$$Q = A\sin(\varphi) \quad (3)$$

Implementazioari dagokionez eta 1 irudian ikusi daitekeen bezala, LLRF hibridoa da. Alde batetik, RF seinalea analogikoki demodulatzen da eta bestetik, I eta Q osagaiak kontrolatzen dituen algoritmoa FPGA (Field-programmable gate array) batean inplementatuta dago, PXI (PCI extension for instrumentation) teknologia erabiliz.

1. irudia. LLRF sistemaren egitura



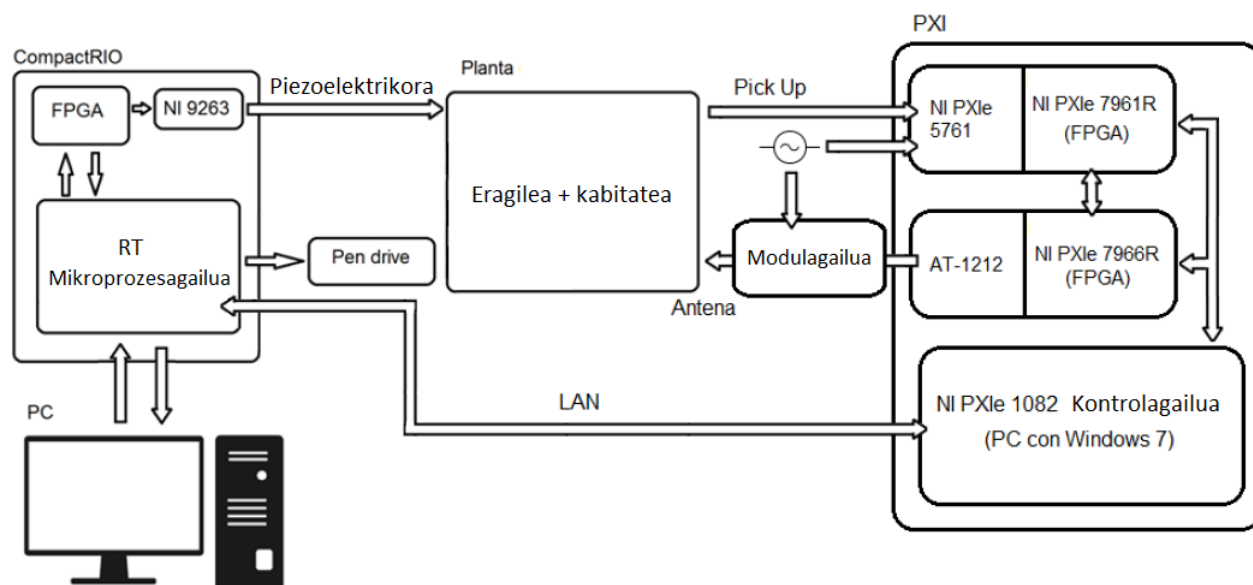
LLRF sistema honek, Injektatutako RF seinalearen fase eta anplitudea kontrolatzeko, 50MS/s-ko laginketa maiztasuna (subsampling (Mishali eta Eldar, 2011)) duen kontrol begizta bat dauka. Begizta horretan, kabitatearen barnean dagoen RF eremua neurtu eta demodulatu ondoren, I/Q osagaietan banatu egiten da. Gero, osagai horiei PI kontrol bat aplikatzen zaie, kabitatearen eremuak konstante mantentzeko kapaza izango den kontrol seinale bat sortzeko. Azkenik, kontrol seinale hori erabilita, 80MHz-eko RF seinale bat modulatu egiten da kabitatean injektatu baino lehen.

Bestalde, LLRF sistemak beste kontrol begizta motelago bat dauka desintonizazio estatikoak zuzentzeko. Horrek, bi motor direla medio, kabitatearen barruan bi enbolo sartu eta atera egiten ditu bere geometria eraldatzeko eta, modu horretan, desintonizazio estatikoa zuzendu ahal izateko.

Lanean zehar, LLRF sistema horretan mikrofoniak kontrolatzeko beste kontrol begizta berri bat inplementatu da. Horrek, RF seinalearen I eta Q osagaien modulazioan berriro oinarrituz, eta eragile piezoelektriko baten bidez, mikrofonien ondoriozko desintonizazioak kontrolatzeko gaitasuna du. Eragile mota horiek heltzen zaien kontrol seinalearen proportzionala den deformazio mekanikoa sortzen dute, mikrometroko zehaztasunez. Aipatu beharra dago, mikrofonien ondoriozko desintonizazioak, I eta Q osagaietan perturbazioak sortzen dituela (fase eta anplitude modulazio moduan).

Kontrol horretaz aparte, LLRF sistemak kabitateak jasaten dituen bibrazio mekanikoak neurtu eta monitorizatu ahal ditu, azelerometro bat dela medio. Modu horretan, sistema berri horrek RF eremuen desintonizazioa eta bibrazio mekanikoen arteko erlazioa aztertzeko aukera bideratzen du. Implementazioari dagokionez, PXI eta compactRIO teknologiaz erabili dira. 2 irudian ikusi daiteke implementazio honen deskribapen orokorra.

2. irudia. Kontrol sistemaren implementazioa



4. RF kabitatearen identifikazio eta ereduztapen matematikoa

Mikrofonien kontrola diseinatzeko, lehenik eta behin kabitatearen identifikazio mekanikoa egin da, horren erresonantzia-modu mekanikoak bilatzeko. Kabitateak jasandako deformazioa erresonantzia modu horietan maximoa denez, mikrofonien efektua ere maximoa izango da bertan. Ondoren, mikrofoniek RF eremuen gainean duten efektua aztertu eta matematikoki ereduztatu da.

4.1. Mikrofonien aurrean RF kabitateak duen erantzun mekanikoaren azterketa

Esperimentu honen helburua kabitatearen erresonantzia-modu mekanikoen kokapena aurkitzea da. Izan ere, maiztasun horietan kabitatea sentikorra izango da perturbazio mekanikoen aurrean. Hau lortzeko, sistemaren eragile piezoelektrikoa erabiliz, kabitatea maiztasun aldakorra duen uhin mekaniko baten bidez kitzikatu da, gero bere erantzun mekanikoa (hormen bibrazioa) neurtzeko.

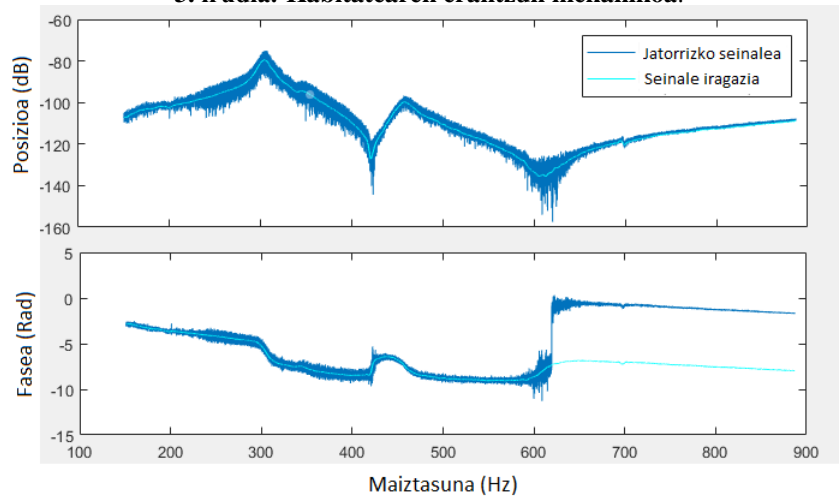
Kitzikapen seinaleari dagokionez, sistemaren modu dinamikoko guztiak kitzikatzeko bezain beste harmoniko izan behar ditu. Kasu honetan, 100-900Hz-eko maiztasun tarteaz aztertuko denez, (bertan ematen direlako normalean mikrofoniak) maiztasun tarte horretan harmoniko ugari dituen seinalea behar da. Gainera, seinalearen energia gehiena maiztasun horietan egotea komenigarria da. Guzti hori kontuan izanda, erabilitako seinalea chirp lineala (Ek. 4) izan da: sinu seinale bat zeinen maiztasuna linealki aldatzen den denboraren menpean.

$$u(t) = A \sin\left(\omega_0 t + \frac{\omega_f - \omega_0}{2T} t^2\right) \quad (4)$$

A seinalearen anplitudea, ω_0 seinalearen hasierako maiztasun angeluarra, ω_f seinalearen bukaerako maiztasun angeluarra eta, azkenik, T seinalearen iraupena izanda. Horrela bada, esperimentuan erabilitako kitzikapenerako chirp-ak 30 segundoko iraupena, 8V-eko anplitudea eta 100-1000Hz-eko maiztasun tarte du. Esperimentua egin ondoren, lortutako kabitatearen erantzun mekanikoa, maiztasun eremuan, 3 irudian erakusten dena da.

Ikusi daitekeenez, kabitateak bi erresonantzia-modu mekaniko ditu 305 Hz eta 458 Hz-etan, lehenengoa nagusia izanik (20 dB gehiago). Modu horretan, kabitatearen egiturak deformazio maximoak jasango ditu 305 Hz-eko frekuentzia duen perturbazio mekaniko baten bidez kitzikatzen denean eta, ondorioz, desintonizazioa maximoa izango da kasu horretan. Aipatu beharra dago, fasearen grafikan jatorrizko seinaleak duen saltoa, datuen

3. irudia. Kabitatearen erantzun mekanikoa.

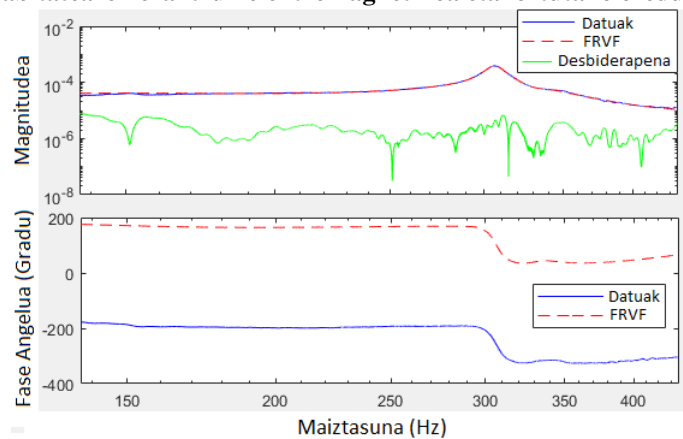


prozesaketan ematen den *wrapping* efektu baten ondoriozkoa dela (hau da, 2π radianeko desfase bat agertzen da).

4.2. Mikrofoniek kabitatearen RF eremuetan duten efektuaren azterketa

Behin kabitatearen erantzun mekanikoa ezagutzen dela, hurrengo esperimentu honetan mikrofonien efektua RF eremuen gainean (desintonizazioa) aztertu da. Horretarako, aurreko ataleko prozedura errepikatu da, baina kasu honetan, LLRF sistema erabiliz, RF eremuen I eta Q osagaiak neurtu dira (hormen bibrazioen ordez). Aipatu beharra dago, bi osagai horiek koadraturan daudenez, RF eremuen desintonizazioari buruzko informazio bera dutela. Beraz, nahikoa da horietako bakar bat aztertzea, kasu honetan, I osagaia. Kabitatearen erantzun elektromagnetikoa matematikoki ereduatzeko vector fitting algoritmoa erabili da. Horren bitartez, kabitatearen RF eremuek perturbazio mekanikoen aurrean duten portaera aurreratu duen eredu matematikoa lortu da, zeinean kontrol algoritmoak simulazioan probatu daitezkeen. Aipatu beharra dago, 500 Hz-etik aurrera, mikrofonien efektua, zarata EM-ren mailakoa dela. Beraz, bertatik aurrerako bibrazioak arbuigarriak direla ondorioztatu da.

4. irudia. Kabitatearen erantzun elektromagnetikoa eta lortutako eredu matematikoa.

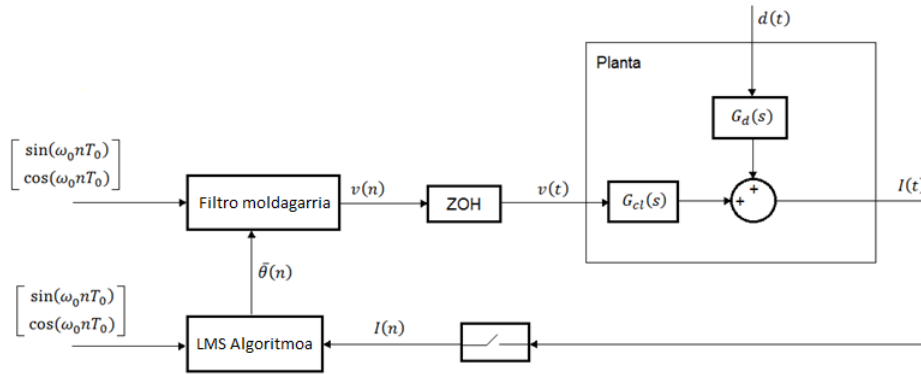


Ikusi daitekeenez, kabitateak erresonantzia-modu mekaniko nagusia duen maiztasunean (305 Hz), mikrofonien efektua oso nabarmena da. Horrek, erresonantzia-modu mekanikoen eta kabitatearen desintonizazioaren arteko erlazioa egiaztatzen du. Izan ere, desintonizazioa kabitatearen geometriaren aldatetaren ondorioz sortzen da eta, lehen aipatu den bezala, deformazio hori maximoa da kabitatearen erresonantzia-modu mekaniko bat kitzikatzen denean. Horretaz aparte, eredu matematikoaren portaera (FRVF kurba) kabitatearen portaeraren oso antzekoa dela ere nabarmendu daiteke. Aipatu beharra dago, bigarren grafikoan eredu matematikoaren eta sistema errealearen faseen arteko desberdintasuna 360 gradukoa dela, beraz, fase berdinak dira.

5. Mikrofonien kontrolaren garapen eta implementazioa

Mikrofonien kontrola egiteko, Adaptive Feedforward kontrol algoritmoa hautatu da. Kontrolagailu horren bidez, mikrofonien anplitude eta frekuentzia berdina, baina alderantzizko fasea duen uhin mekanikoa aplikatuko zaio kabitateari. Modu honetan, mikrofonia eta kontrol-uhinen arteko interferentzia suntsitzailea gertatuko da eta, ondorioz, mikrofonien efektua gutxituko da.

5. Irudia: AFF kontrolaren egitura



Lehenik eta behin, algoritmo hori maiztasun bakarreko mikrofoniak kontrolatzeko gai dela aipatu beharra dago. Bere funtzionamendua hurrengokoa da: Alde batetik, filtro moldagarri batek, koadraturan dauden eta mikrofonien maiztasun berdina duten bi sinusoide anplitudez aldatu eta batu egiten ditu, kontrol seinalea sortzeko. Paraleloki, LMS algoritmo batek kabitatearen irteera (I osagaia) minimoa bilakatzeko, filtroak izan behar dituen parametroak kalkulatzeko momentu oro. (Shi *et al.*, 2004) lanean azaltzen den prozesua jarraituz, hurrengokoak dira inplementatu beharreko ekuazioak (filtroaren anplitudeak).

$$A_1(n) = A_1(n - 1) + \gamma I(n) \sin(\omega_0 n T_0) \tag{5}$$

$$A_2(n) = A_2(n - 1) + \gamma I(n) \cos(\omega_0 n T_0) \tag{6}$$

$A_{1,2}$ filtro moldagarriaren parametroak, ω_0 mikrofonien maiztasuna, $I(n)$ RF eremuen I osagaia eta γ kontrol parametro bat izanik.

Lehenengo, algoritmoaren funtzionamendua simulazioan frogatu da, 4.2 atalean lortutako eredu matematikoa eta Simulink programa erabiliz. Bertan, kontrolagailuaren errendimendua hainbat kasutan aztertu da eta hau ondorioztatu da: Alde batetik, $I(n)$ irteera seinalearen atzerapenarekin esperimendu da, algoritmoaren sendotasuna berretsiz, izan ere, 0.1 segundoko atzerapena baino gehiagorekin ere mikrofoniak deuseztatzeko gai da. Bestalde, mikrofonia eta kontrol seinaleen maiztasunen arteko aldea minimoa izan behar duela ikusi da (0,3 Hz-eko desberdintasunarekin, errendimendua asko murrizten da).

Azkenik, algoritmoa LLRF sistemaren NI 7966R moduluko FPGA-n inplementatu da. Horren funtzionamendua frogatzeko, 305 Hz-eko perturbazio konstante bat aplikatu zaio kabitateari, eta AFF kontrola aktibatu ostean, mikrofonien ondoriozko desintonizazioa %95a murrizten dela ikusi da.

6. Ondorioak

Mikrofoniak kontrolatzeko sistemak inplementatu baino lehen, beharrezkoa da horien funtzionamendua prototipoetan aztertzea. Lan honetan, horrelako sistema baten garapenerako prozesua diseinatu eta probatu egin da, baita emaitza egokiak lortu ere.

Prototipoaren garapenean zehar, RF kabitarearen erresonantzia-modu mekanikoen garrantzia frogatu da mikrofonien ondoriozko desintonizazioan. Izan ere, mikrofonía batek kabitarearen erresonantzia-modu mekaniko bat kitzikatzeko beharrezkoa den maiztasuna baldin badu, perturbazio mekaniko horrek kabitarearen geometrian sortutako deformazioak nabarmenak izango dira eta bere eragina barneko RF eremuetan handia izango da.

Beste alde batetik, AFF kontrol algoritmoaren sendotasuna frogatu da maiztasun bakarreko mikrofonía kontrolatzeko. Halere, azeleragailu modernoetan ematen diren mikrofonía gehienak (eta arazo gehien sortzen dituztenak), kriostatuan dagoen helio likidoan sortzen diren burbuilen ondoriozkoak dira. Mikrofonía mota horiek maiztasun espektrora anitza dute eta, beraz, horien kontrola egiteko beste algoritmo batzuk erabili behar dira. Aipatu beharra dago, behin prototipoa garatuta dagoela, algoritmoak inplementatzea eta probatzea oso erreza dela; izan ere, sistemaren FPGA-n kontrola inplementatzea nahikoa da.

7. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lortutako prototipoari dagokionez, hurrengo pausoa da hainbat algoritmoen errendimendua frogatzea. Adibidez, maiztasun bat baino gehiagoko mikrofonía kontrolatzeko, AFF algoritmo batzuen inplementazio paraleloa aztertea interesgarria izan daiteke. Bestalde, eragingailu berrien errendimendua frogatzea ere egokia da.

Epe luzera, hemen landutako prozesua jarraituz, prototipo berri bat garatzea interesgarria izango litzateke, kabitare supereroaleekin eta horiei dagozkien eragile piezoelektrokoak erabiliz. Horrela, gaur egungo azeleragailuetan ematen diren egoerak fidelki erreproduzitu ahalko lirateke eta kontrolagailuak frogatzeko aukera ezin hobea izango litzateke.

8. Erreferentziak

- Badillo, I., 2015. *Advanced Techniques for Diagnostic and Control Applied to Particle Accelerators*.
- Berek, T., K. Cook, eta Y. Vannoy. 2015. General narrowband noise cancellation development at the aps. In *First Microphonics Workshop*.
- Geng, Z. 2017. Superconducting cavity control and model identification based on active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Nuclear Science*.
- Humphries, S. 2012. *Principles of Charged Particle Acceleration*, volume 1. Dover Publications, 2 edition.
- Kandil, T. H., H. K. Khalil, J. Vincent, T. L. Grimm, W. Hartung, J. Popielarski, R. C. York, eta S. Seshagiri. 2005. Adaptive feedforward cancellation of sinusoidal disturbances in superconducting rf cavities. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.
- Liepe, M. 2015. Microphonic experience at cornell- a collection of results. In *First Microphonics Workshop*, volume 12, 283–290.
- Mishali, M., eta Y. C. Eldar. 2011. Sub-nyquist sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*.
- Neumann, A., W. Anders, O. Kugeler, eta J. Knobloch. 2010. Analysis and active compensation of microphonics in continuous wave narrow-bandwidth superconducting cavities. *Physical Review Special Topics*.
- Padamsee, H. 2009. *RF Superconductivity: Science, Technology, and applications*. Verlag GmbH & Co. kGaA.
- Posen, S., eta M. Liepe. 2011. Minimizing microphonics detuning by optimization of the stiffening rings. In *Proceedings of SRF*.
- Powers, T., 2015. Microphonics.
- Rybaniec, R., K. Przygoda, V. Ayvazyan, J. Branlard, Ł. Butkowski, W. Cichalewski, S. Pfeiffer, C. Schmidt, H. Schlarb, eta J. Sekutowicz. 2016. Fpga based rf and piezo controllers for srf cavities in cw mode. In *IEEE-NPSS Real Time Conference (RT)*.
- Scheinker, A., S. Baily, D. Young, J. S. Kolski, eta M. Prokop. 2014. In-hardware demonstration of model-independent adaptive tuning of noisy systems with arbitrary phase drift. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.
- Shi, J., R. Zmood, eta L. Qin. 2004. Synchronous disturbance attenuation in magnetic bearing systems using adaptive compensating signals. *Control Engineering Practice*.
- Vincent, J., D. Morris, N. Usher, Z. Gao, S. Zhao, A. Nicoletti, eta Q. Zheng. 2011. On active disturbance rejection based control design for superconducting rf cavities. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.