

Quartz Accelerometer Closed Loop Analog Readout Circuit

 M. Oğuz GÜNBAZ^{1,*}  M. Timur AYDEMİR² 
^{1,2} Gazi University Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering,,06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
 Received: 13/05/2019
 Revision 18/05/2019
 Accepted: 06/08/2019

Highlights

- IMU
- Tactical Grade
- Matlab-Simulink

Keywords

Accelerometer
 Capacitive Sensors
 PWM

In this study, analog circuit design for the precision reading circuit of the tactical grade accelerometer is presented. Quartz accelerometer is modeled mathematically by dividing its structure into subunits. Optimal circuit structure has been reached within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype which has been tested in the laboratory environment. The production and design objectives have been evaluated by comparing the measurements and simulation results.

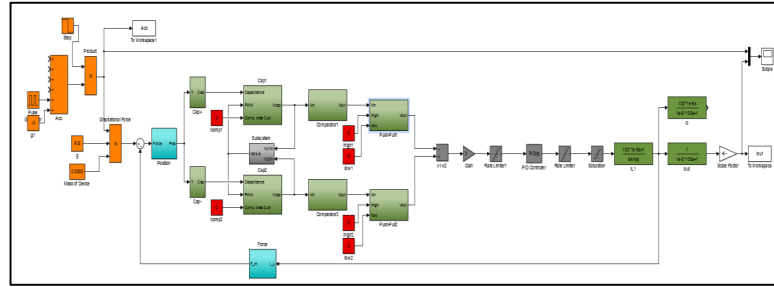


Figure A. MATLAB/SIMULINK model of the proposed circuit

Purpose: In this work, different types of accelerometer structures have been reviewed. Literature has been searched and key points of analog circuits were re-optimized. A new read out circuit is proposed for better accuracy. The implemented circuit have been tested in three different ways to improve it is employable in tactical areas.

Theory and Methods: A new read-out circuit is explained in detail. It has been modeled on MATLAB/SIMULINK. Firstly, the circuit topology has been studied, and then the model has been transferred to the simulation environment. After revisions, the final simulation model have been implemented. The implemented circuit has been tested in three different ways which are used for qualification of accelerometer sensors to improve their employability in tactical areas.

Results: According to the test results, the implemented closed loop accelerometer has 0.369 mg bias error. After this results the accelerometer has been placed into different test environments and the results prove that it is usable from -40 °C to +71 °C and its bias instability is 0.002 mg/√Hz according to Allan Variance test. The simulation and experimental results are presented and compared in Section 4.

Conclusion: In this paper, a high performance capacitive closed loop analog accelerometer reading circuit is presented. Modeling of complex systems is an important part of the design process in order to comprehend the behavior of the system. Optimal circuit structure has been reached in the work conducted within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype In the light of the results of the tests, it was found that the developed accelerometer reading card produces output to meet the technical requirements of a tactical / navigation level quartz accelerometer.



Kuvars İvmeölçer Kapalı Döngü Analog Okuma Devresi

M. Oğuz GÜNBAZ^{1,*} M. Timur AYDEMİR²

^{1,2}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Öz

Bu çalışmada taktik seviye kuvars ivmeölçerlerin hassas okuma devreleri için analog devre tasarımı yapılmıştır. Kuvars ivmeölçer yapısı alt birimlerine ayrılarak matematiksel olarak modellenmiştir. Hazırlanan modelleme üzerindeki parametre değişimlerinin sonuçlarını gözlemlemek üzere model MATLAB-SIMULINK ortamına aktarılmıştır. Literatürde önceden yapılan çalışmalar ışığında açık ve kapalı döngü devre modelleri üzerinde durulmuş ayrıca gerilim frekans dönüşümü ya da Σ - Δ dönüşümü gibi pek çok tasarım modeli üzerinde çalışılarak, ideal tasarım oluşturulmuştur. Oluşturulan benzetimin gerçek koşullara uygun olması amacıyla bileşenlerin ve diğer gürültü oluşturabilecek kaynakların etkileri benzetime yansıtılmıştır. Bu model kapsamında yapılan çalışmalarda optimal devre yapısına ulaşılmış ve bu devre prototipe aktarılıp gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan modeller ışığında devre yapısının nihai hali ortaya çıkarılmış ve bu yapı önce şematiğe ardından baskı devre kartı üzerinde hayata geçirilmiştir. Gerçeklenen okuma devresi laboratuvar ortamında çeşitli test düzeneklerinde denenmiş ve parametreleri çıkarılmıştır. Elde edilen ölçümler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış, üretim ve tasarım hedeflerinin uyumluluğu değerlendirilmiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 13/05/2019
Düzeltilme: 18/05/2019
Kabul: 06/08/2019

Anahtar Kelimeler

İvmeölçer
Kapasitif Sensörler
PWM

Keywords

Accelerometer
Capacitive Sensors
PWM

Quartz Accelerometer Closed Loop Analog Readout Circuit

Abstract

In this paper, an analog circuit design for the precision reading circuit of the tactical grade accelerometer is presented. Quartz accelerometer is modeled mathematically by dividing its structure into subunits. This model has been transferred to MATLAB-SIMULINK environment to observe the effects of some parameter changes on the model. In the light of the studies that exist in literature, open and closed loop circuit models are emphasized and the ideal design has been formed by working on many design models such as voltage frequency conversion or Σ - Δ transformation. The effects of the components and other sources of noise are taken into account in the simulation in order to ensure that the simulation is compatible with the actual conditions. Optimal circuit structure has been reached in the studies conducted within the scope of this model and this circuit has been transferred to a prototype. In the light of prepared models, the final structure of the circuit is revealed and this structure is first implemented on the schematic and then on the printed circuit board. In the laboratory environment, the test circuit is tried and tested. By comparing the obtained measurements and simulation results, the comparison of production and design objectives are evaluated.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

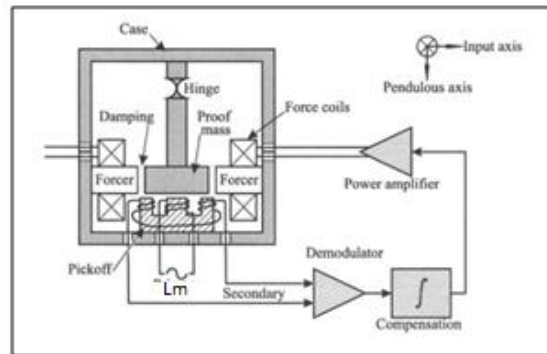
Kapasitif ölçüm sisteminde sabit elektrotlar arasında hareketli zar şeklinde özel üretim teknikleri ile işlenmiş bir yapı bulunur. Bu yapı için genellikle kuvars (quartz), adı verilen kristal yapıli maddeler kullanılır. Yapının ivmeye maruz kalması sonucunda ivme ile ters yönde hareketlenen kuvars plaka kapasitanslarda değişime neden olur. Bu kapasitanslarda meydana gelen değişim hassas ölçüm metotlarıyla ölçülerek ivme verisine çevrilir. Taktik seviye askeri ölçümlerde kullanılmak üzere genellikle en hassas ölçüm metodu olan kapasitif ölçüm metodu kullanılır. Yüksek gerilim hassasiyeti, uzun vadede ölçümlerde sapma olmaması, sıcaklığa bağlı olarak fazla sapma göstermemesi ve düşük gürültü yapısı gibi ilerleyen bölümlerde üstünde duracağımız pek çok sebep bu ölçüm tarzının taktik uygulamalarda tercih edilmesine neden gösterilebilir. Tüm bu sebeplerden ötürü bu makalede de ivmeölçerin amacı doğrultusunda yüksek

çözünürlük, düşük ortam gürültüsü, geniş bant genişliği ve dinamik sistem gereksinimlerinden dolayı kapasitif ölçüm metodu kullanılmıştır. Kapasitif ivmeölçerler meydana gelen kapasitans değişimini ölçmek ve anlamlandırmak için hassas kapasitans okuma devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Okuma elektronigi ve hassas kuartz işleme süreçleri açısından oldukça karmaşık gibi görünen bir üretim süreci olsa da tasarımın oturması sonrasında yüksek güvenilirlikte hassas ivmeölçerler üretilebilmektedir. Hem elektronik hem de mekanik bir çok bileşenden meydana gelmesi dolayısıyla performans açısından optimal tasarıma ulaşmak pek çok etkene bağlıdır. Optimal tasarım için oldukça farklı çalışmalar yapılmış [1], [2], [3] ve hali hazırda yapılmaktadır. Bu makalede de taktik seviye kullanımlar için kapasitif sensör okuma devresi tasarımı sunulmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde kapasitif ivmeölçerlerin çalışma prensibi genel hatlarıyla anlatılmıştır. Üçüncü bölümde anlatılan prensiplerin modele aktarılması üzerinde durulmuştur. Oluşturulan modelleme üzerinde yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan sonuçların değerlendirildiği dördüncü bölümde, modelden yola çıkılarak üretilen prototip de ayrıca yer verilmiştir. Son olarak beşinci bölümde de elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KAPASİTİF İVMEÖLÇER KURAMI (CAPACITIVE ACCELEROMETER THEORY)

Sensör teknolojilerinde, sensörün okuma devresinin genel performans etkisi yadsınamaz. Literatür çalışmalarında karşımıza en sık çıkan ivmeölçer elektronik okuma devreleri genelde üç temel yapı üstüne geliştirilmiştir [4]. Bu okuma devrelerinin ilki gerilim yükselticili ac-köprü yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada aralarında 180° faz farkı olan iki darbe sinyali kapasitanslara uygulanır ve kapasitanslar arasındaki fark ölçülmeye çalışılır. Basit bir konfigürasyona sahip olsa da gürültü bakımından taktik uygulamalar için azami gürültü sınırlarının içine dahil edilememektedir. İkinci olarak karşımıza çıkan diğer bir yöntem transempedans yükseltici modelidir. Bu yöntemde de kapasitanslara aralarında 180° faz farkı olan iki sinüs sinyali uygulanmakta ve yükselteç arasında rezistif bir devre elemanı ile geri bildirim sağlanmaktadır. Çeşitli avantajları olsa da istenen bant genişliğinin sınırlı olmasında dolayı taktik uygulamalarda tercih edilmemektedir. Üçüncü ve yaygın kullanım olarak da genelde tercih edilen kapasitör anahtarlamalı devreler kullanılmaktadır. Bu yöntemde ayrı polaritelerle şarj edilmiş iki adet kapasitör kapasitans değişimleri kıyaslanıp entegrali alınıp çıkışa verilerek ivme verisi ölçülmektedir. Bu makalede ele alınan okuma metodu birçok açıdan kapasitör anahtarlamalı devreler ile benzerlik gösterse de devre yapısı oldukça farklıdır. Kapasitör şarj devresi literatür açısından oldukça farklı ve efektif bir çözüm getirmiştir. Bu devre modelinin özellikle yer kısıtı olan ivmeölçer okuma devreleri için optimal bir çözüm olacağı değerlendirilmektedir. Kapasitanslardan okunan kapasitans değerlerinin işlenip anlamlı verilere dönüşmesi için de literatürde daha önce kullanılmış Gerilim-Frekans Dönüşüm Metodu kullanılmıştır [5].

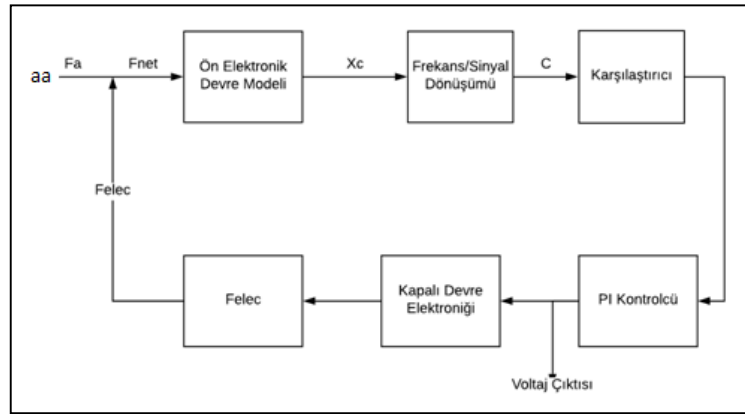


Şekil 1. Kuvars İvmeölçer Genel Çalışma Prensibi

İvmeölçer modelinin sabit olan alt ve üst plaka arasında, tek taraftan tutturulan ama aşağıya ve yukarıya eğilen kuvars plaka vardır. Kuvars plaka ile üst ve alt plaka arasında kapasitans oluşur ($C1$, $C2$). Sensör ivme ekseninden ivme gördüğünde kuvars ivmenin yönüne göre aşağıya veya yukarıya doğru eder ve hareket yönüne göre kapasitansların biri azalırken diğeri artar. Bu artış ve azalma sırasında meydana gelen polarizasyon elektrik sinyallerine dönüştürülerek işlenir ve aralarında oluşan farka göre bir akım verisi elde edilir Elektronik devre de bu kapasitans değişimini ölçerek ona göre bobinlerin (Lm) üzerinden geçen akımı değiştirir ve kuvarası tekrar orta noktaya almaya (kapasitansları eşitlemeye) çalışır [6]. İvme ne kadar

yüksekse L_m üzerinden de o kadar çok akım geçer. L_m üzerinden geçen akım sensör tarafından analog ivme verisi olarak verilir.

Bu yapı Kapalı Devre İvmeölçer Modeli olarak adlandırılır. Literatürdeki birçok örnekte olduğu gibi [1], [2], [3], kapalı devre bir ivmeölçer, temel olarak sismik kütle hareketini belli bir noktada sınırlar, ki bu genellikle referans pozisyonudur. Bu yapıda sismik kütle denge noktasında sabit tutulması için devreye uygulanan akımı ölçmek temel amaçtır. Sismik kütle denge noktasında tutulması için gereken akım uygulanan ivmenin derecesine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Bu akımın ölçülmesi bize iki kapasitansın farkları arasındaki değeri dolaylı olarak vermektedir. Kapalı devre akımı indüktörler üzerinden geçip kuvars plakayı denge noktasına getirdikten sonra yine akım olarak sensör dışında bulunan hassas dirençler üzerinden gerilim verisine dönüştürülür. Bu veriler bize kapasitörleri dengelemek ve aynı zamanda da kapasitanslar arasında oluşan kapasitans farkı hakkında bilgi verir [7].



Şekil 2. Kuvars İvmeölçer Blok Diyagramı

Şekil 2'de 'aa' ile sistemin maruz kaldığı ivme, ' F_a ' sismik kütle hareketi maruz kaldığı ivme sonucu üzerinde oluşan gücü göstermektedir. ' F_{elec} ' ise indüktörlerden geçen akım sonucu üretilen manyetik kuvveti, ' F_{net} ' sismik kütle hareketi etki eden net kuvveti, ' x ' sismik kütle hareketi yer değişimini simgelemektedir. ' ΔC ' ise kuvars sensördeki yer değiştirme sonucunda kapasitanslarda meydana gelen değişimi simgelemektedir. ' V ' ise kapalı devre kapasitans ölçüm devresinin hemen sonuna yerleştirilen dirençten okunan gerilim değerini ifade etmektedir.

$$\vec{F}_{elec} = L \times (\vec{I} \times \vec{B}) \quad 1$$

$$\frac{dC_p}{dx} = + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} \quad 2$$

$$\frac{dC_p}{dx} = + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} \quad 3$$

$$\frac{dC_n}{dx} = - \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} + x)^2} \quad 4$$

Yukarıda bahsedilen sismik kütle ve üst plaka arasında meydana gelen kapasitans (dC_p) ve alt plaka arasında meydana gelen kapasitans (dC_n) değerlerindeki değişim 2 ve 3 numaralı denklemlerde verilmiştir. Bu denklemlerde ϵ boş uzayın elektriksel geçirgenliğini, A_{tot} plakaların alanını ve d_{gap} sabit halde plaka ile sismik kütle arasındaki boşluğu ifade etmektedir. Bu denklemlerden yola çıktığımızda sensörler için en önemli olan hassasiyet derecesine aşağıdaki denklem ile ulaşılabilir:

$$\frac{d\Delta C}{dx} = \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} - x)^2} + \frac{\epsilon \times A_{tot}}{(d_{gap} + x)^2} \quad 5$$

Kapalı devrelerin açık devreye oranla en büyük farkı ve tercih edilmesinin sebebi hassasiyet oranlarının oldukça yüksek olması. Bunun en büyük sebebi de 4'üncü denklemde görüldüğü üzere sismik kütle hareketi yer değişimi ile bunun sonucunda ortaya çıkan akım arasındaki doğrusal ilişkiden kaynaklanmaktadır. Kapalı devre altında plakalar arasındaki mesafe sabit olduğundan ' x ' yaklaşık olarak sıfır alınabilir, bu durumda 5 numaralı eşitlikte gösterildiği üzere sensörlerin kapasitif hassasiyetleri dC/dx ve sistemin genel hassasiyeti

$d\Delta C/dx$ tüm kapalı devre çalışması sırasında sabit olarak alınabilir. Bu yaklaşım sayesinde kullanılan kapalı devre kapasitif okuma devreleri doğrusal olarak kabul edilebilir.

Kapalı devre kontrol döngüsü en yaygın tanımıyla kontrol edilen değişkenin sürekli olarak monitör edilmesi ve referans alındığı değerle sürekli olarak karşılaştırılması sürecine dayanır. Bu karşılaştırma sonucu her döngüde karşılaştırıldığı referansa yaklaşmak için adaptasyona uğrar. Bu şekilde kontrol eden değişkenin kendini etkilemesi sonucu devam eden kapalı bir işlem döngüsü ardı sıra gerçekleşir. Orantılı integral kapalı devre kontrolcüsü sayesinde referans alınan değerlere kolayca ulaşılabilir, sistemin referans sinyalinde meydana gelen sık değişikliklere hızlı cevap vermesi ve sabit durum hatalarını sıfırlanması sağlanabilir. Kontrol sisteminin ileride meydana gelebilecek hataları kestirip müdahale etmesi sensör uygulamalarında tercih edilen bir yöntem değildir. Bu amaçla sistemde türev kontrolüne başvurulmamıştır.

Kuvars ivmeölçer sisteminin çalışma hassasiyeti ve çözünürlüğü mekanik ve elektronik gürültü kaynakları olarak iki ana başlıkta incelenen gürültü kaynaklarına bağlıdır. Mekanik gürültü kaynaklarının başında temel olarak sistemin frekansına, sıcaklığa ve sismik kütleyle bağlı, "Brownian Gürültüsü" gelmektedir. Brownian Gürültüsü, en önemli mekanik gürültü kaynağı olmasına rağmen elektronik gürültünün yanında etkisi önemsiz olacaktır ve bu tasarımın içine dahil olmadığı için göz ardı edilmiştir.

İvmeölçer elektroniğinde sistemin genel performansını belirleyecek bir çok elektriksel gürültü kaynağı mevcuttur. Bu gürültü kaynakları genellikle bileşenlerin ısı ile değişiminden ve analog sinyalleri işleyip kare dalga sinyallerine dönüştüren arabirimlerde meydana gelen hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu hataların etkisi işlemsel yükselteç ve kıyaslayıcı entegrelerinde karşımıza sıkça çıkan ofset gerilimi, ortak mod bastırma oranı (CMMR), V_{hyst} , V_{ref} vb. gibi değerler olarak sıralanabilir. Histerezis gürültüsü simülasyona belirsizlik olarak eklenmiştir. Brownian Gürültüsü (k_b : Boltzman sabiti, T: Sıcaklık, b : Bant genişliği), CMMR (A_D : diferansiyel kazanç, A_{CM} : ortak mod kazanç), ve V_{offset} gürültü kaynaklarının modellenmesinde kullanılan formüller aşağıda verilmiştir:

$$a_n^2 = \frac{4k_b T b}{9.81^2 m^2} \quad 6$$

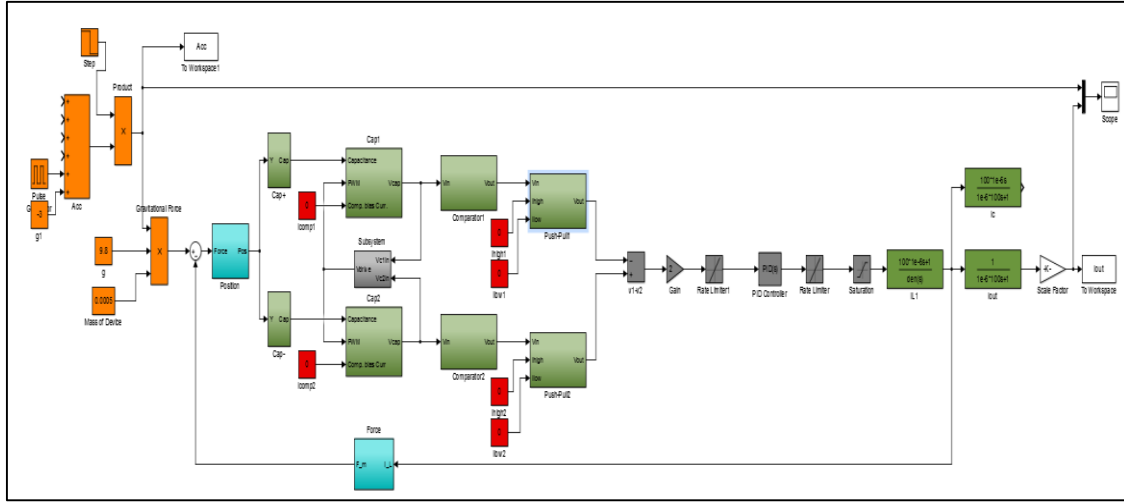
$$CMMR(db) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_D}{A_{CM}} \right) \quad 7$$

$$V_{Tot} = V_+ + V_{offset} \quad 8$$

3. KAPASİTİF İVMEÖLÇER MATLAB/SİMULİNK MODELLEMESİ (CAPACITIVE ACCELEROMETER MATLAB/SIMULINK MODELLING)

Kompleks sistemlerin modellenmesi sistemin davranışının kavramak açısından tasarım aşamasında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. İvmeölçer de bu açıdan değerlendirildiğinde modellenmesi gereken oldukça çok değişkene bağlı bir sistemdir. Temel işlevlerini modele doğru uygulamak için mekanik kuvars bölüm, sensör okuma bölümü, kontrolcü bölümü, sürücü bölümü ve geri bildirim bölümlerinin uygulanması gerekmektedir. İvme verisinin elde edilmesi için sensörden çıkan geri bildirim akımını da okuyup ileten elektronik devreler bulunmaktadır ama bu makale kapsamında o bölüm modelde ele alınmamaktadır. Sensör tasarımı tamamıyla analog elektronik tasarım prensiplerine dayanmaktadır ve herhangi bir kod ya da algoritma barındırmaktadır.

Sistem dinamiğinin kararlı yapıda olması sistem açısından önem taşımaktadır, bu nedenle sistemin kapatılıp geri bildirim sağlanan bölüm parametrelerinin belirlenmesi üzerinde ayrıca durulmaktadır. Sistemin mekanik bir bileşeni olan kuvars, ölçüm işini yapan plakaların olduğu bölümdür. Bu bölümün mekanik üretim kalitesi sensörün kalitesini ve hassasiyetini belirleyen en önemli faktördür. Bu bölüm, uzun zaman önce üretilmiş ve hali hazırda sınırları, kapasitesi ve kalitesi belli olduğu için simülasyonda herhangi bir gürültü unsuru teşkil etmeyeceği varsayılmıştır. Mekanik olarak daha basit modele karşılık bu makale kapsamında asıl ele alınan elektronik modelde simülasyonlar olabilecek en gerçeğe uygun model bloklarından oluşturulmaya çalışılmıştır.



Şekil 3. İvmeölçer MATLAB/SIMULINK üst modeli

Kuvars sensörün mekanik performansı, beyaz gürültü, ölçeklendirme, olası hata oranı veya kararlılık faktörü gibi bazı alt sınıflara ayrılarak modellenilebilir. Bu makale kapsamında sistemin sadece beyaz gürültü performansı simülasyonda ele alınmaktadır. Bunun dışında kalan mekanik gürültü kaynaklarının etkisi beyaz gürültünün etkisiyle kıyaslanamayacak oranda küçük oldukları için simülasyona dahil edilmemiştir. Simulatörün gürültü özelliklerinin modellenmesinde, [1], [2] ve [3] 'den daha detaylı bir yaklaşım uygulanmıştır. [1], [2] ve [3] 'de modellenen sistemler kuvars sensörler ve tamamen analog devre yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmada, gürültü kaynakları modele girdi olarak eklenmiş, hesaplanmış ve modellenmiştir. Giriş gürültüsü kaynakları ve sistem dinamiği, çıkış gürültüsü performansını etkilemiştir. Devre yapısı ve modelleme yaklaşımı, bu çalışmanın literatürdeki çalışmalarından ayrılan en önemli özelliğidir.

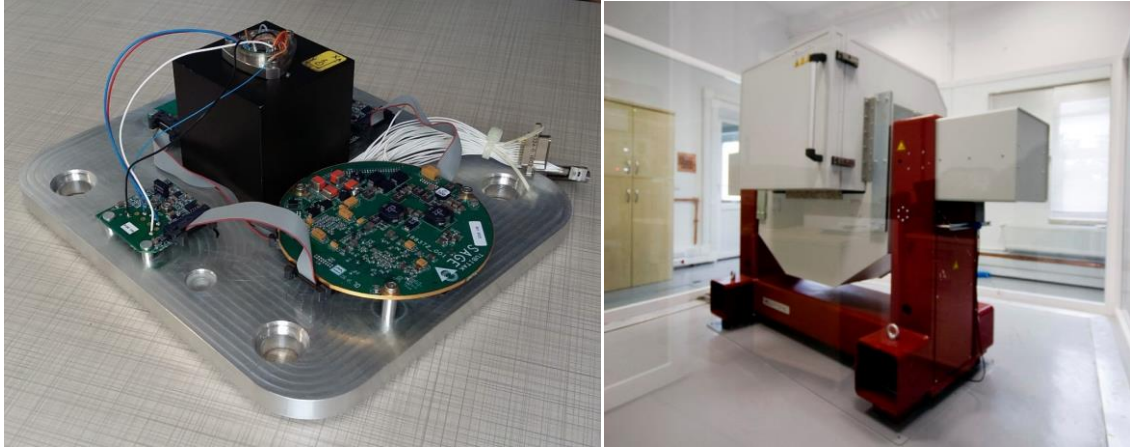
İvmeölçer gürültü performansını etkileyen hususlar detaylı olarak ele alınmıştır. Simülasyonda gürültü blokları olarak eklenecek 6 önemli gürültü kaynağı belirlenmiştir: Bunlar sırasıyla elektronik bileşenlerin gerilim gürültüsü, akım gürültüsü, dirençlerin termal gürültüsü, histerezis, CMMR, besleme gerilimi baskılama oranı (SVR) , gecikme süresi ve kuvars bloktan gelen beyaz gürültü kaynaklarıdır. Ayrıca integral alma blokları ve filtreleme blokları gibi gürültü giderme teknikleri simülasyona dahil edilmiştir. Bu kavramlar, gürültü kaynakları ve sistemin çıkış gürültüsü performansı arasındaki ilişkinin analizinde önemli bir rol teşkil etmektedir. Bu konseptlerin modele eklenmesi, kullanıcının tasarım konularını istenen performansa göre şekillendirmesini sağlamıştır.

Şekil 3'de ivmeölçer modeli verilmiştir. Her ne kadar çeşitli ivmeölçer konfigürasyonları olsa da, modelleme tasarımı sektörde en son ve en yaygın kullanılan konfigürasyon olan kapalı döngü sistemine sahip kuvars ivmeölçer formuna dayanmaktadır [8].

Model, kuvars ivmeölçer'in ana parçaları olan alt modeller tarafından oluşturulmuştur: Mekanik Kuvars Sensör Bloğu, Şarj Devresi Bloğu, Karşılaştırıcı ve Sürücü Elektronik Bloğu ve Yük Transfer Bloğu olarak gruplanabilir.

Mekanik kuvars sensör bloğu öncesinde sisteme girdi olarak verilen ivmenin g biriminden değeri belirlenir. Sisteme step, sinüs, kare, rampa gibi girdiler verilebilir. "Gravitational Force" kısmı kuvarsa uygulanan ivmeyi güce çevirmek için kullanılır. Birimi Newton'dur (N). Basitçe $F=m.a$ formülü uygulanmaktadır. Kuvarsa ağırlığı 0.5g olarak sisteme verilmiştir. Ardından ivmeye göre şekillenecek plakaların pozisyonlarının simgeleyecek pozisyon bloğu gelmektedir. Bu blokta önce kuvarsa uygulanan ivmesel güçten bobinler üzerinden gelen elektriksel itiş gücü çıkarılır. Sonuç olarak kuvarsa uygulanan net güç elde edilir. Sonrasında oluşturulan bloğun çıktısı olarak kuvarsa orta noktasının iki sabit plakanın orta noktasına olan uzaklığı elde edilmektedir.

Plakaların mevcut konumlarından yola çıkarak kapasitans değerlerini ölçmek için, ölçüm ardından kapasitörlerde meydana gelen gerilimi boşaltıp yeniden sürücü sinyal bloğu oluşturulmuştur. Bu



Şekil 5. Test tablası, kartlar ve 3 eksenli benzetimci

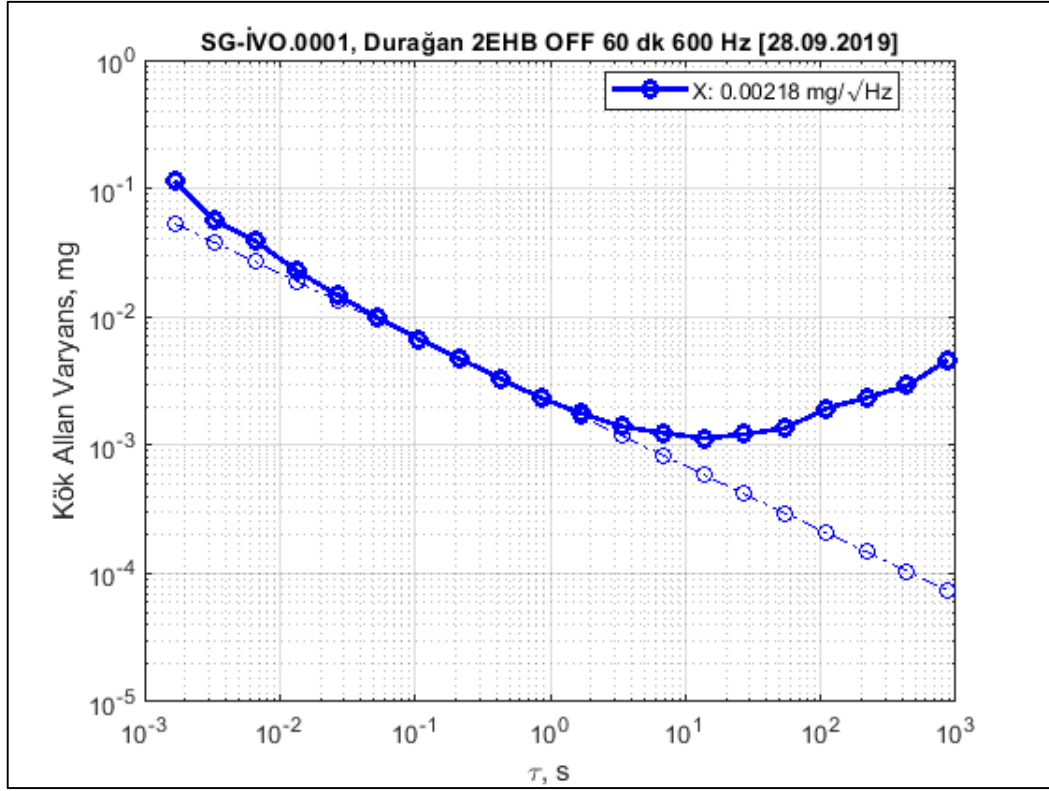
Testlerdeki verilerin MATLAB programında işlenmesi sonucunda SG_İVO.0001 kartı için ivmeölçer sabit kayma hatası aşağıdaki tablo incelendiğinde sabit kaymanın ortalama değerinin 0.369 mg (< 4 mg) olduğu, tekrarlanabilirlik değerinin ise 0.008 mg (< 0.55 mg) olduğu görülmektedir. Buna göre, koşul değerler aşılmamıştır. İvmeölçer sabit kayma değeri ve tekrarlanabilirlik değeri taktik seviye bir ivmeölçer için yeterlidir. Sabit kayma dışında ölçülen bir değer de eksenlerin birbirini ne kadar etkilediği diğer eksen üzerinde ne kadar gürültü oluşturduğunu anlamamızı sağlayan açı kaymalarıdır. Yapılan testler sonucunda Z eksenin X eksenini üzerinde (A_{31}) ve Z eksenin Y eksenini üzerinde (A_{32}) oluşturduğu gürültü tablo 1'de verilmiştir. Ayrıca kapalı devre ölçüm sisteminin orantı katsayısı 1.0252 olarak saptanmış ve ne kadar kalibre edilebilir olduğu hakkında fikir verecek olan orantı katsayısı tekrarlanabilirlik oranı 59.08 ppm olarak kayıtlara geçmiştir. Bu değerler, şu an kullanımda olan diğer taktik seviye ivmeölçerlerin katalog verileri ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek hassasiyete sahip bir devre yapısı oluşturulduğunu göstermiştir.

Tablo 1. İvmeölçer açı kaymaları (AK)

	AK Değerleri (mrad)	AK Tekrarlanabilirliği (mrad)
	+20 °C	+20 °C
A_{31}	2.5728	0.0143
A_{32}	-0.3857	0.0146

Tablo 1. İvmeölçer orantı katsayısı (OK)

	OK Değerleri	OK Hatası (ppm)
	+20 °C	+20 °C
A_{11}	-	-
A_{22}	-	-
A_{33}	1.02520530	59.08



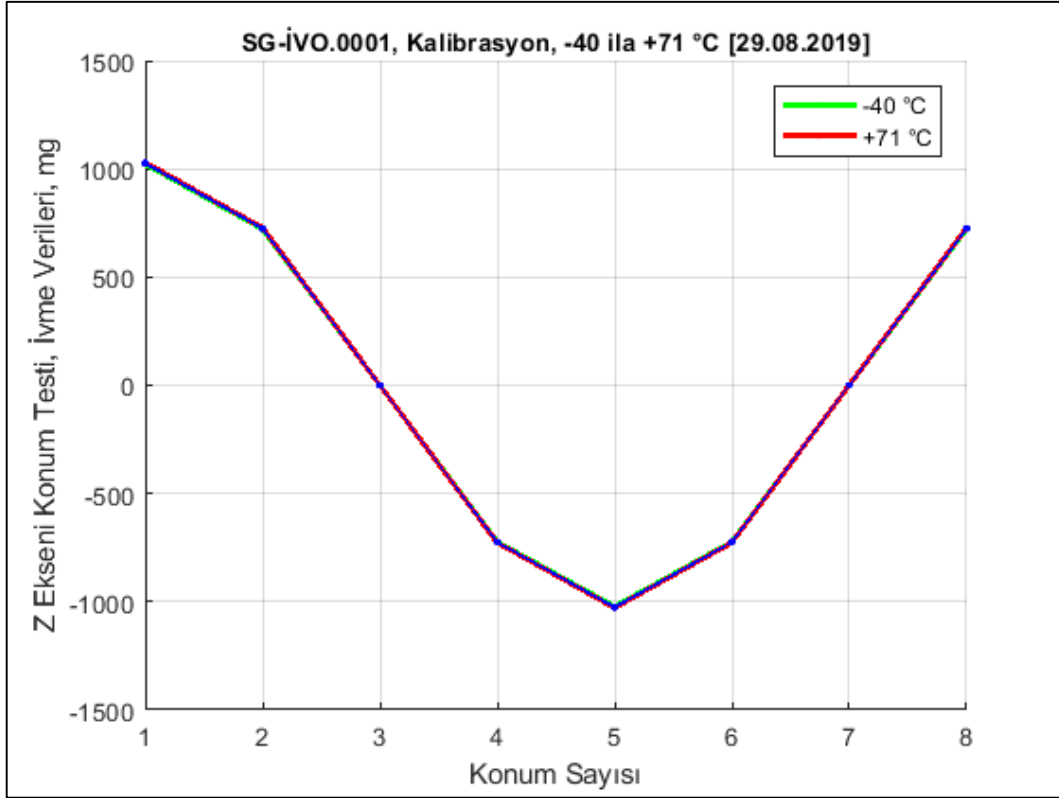
Şekil 6. İvmeölçer Allan Varyans grafiği – VRW 0.002 mg/√Hz

Yukarıda verilen hız rastgele yürüme kararsızlığı (VRW) grafiğinde görüldüğü gibi ivmeölçer elektroniğinin çalışması sırasında süreye bağlı olarak değişen gürültü karakteri oldukça düşüktür (0.002 mg/√Hz). Sabit kayma hatasının zamana yayılmış kararsızlık grafiği Şekil 4.10 'da görüldüğü gibi 2 µg olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kapsamında durgun hal analizleri sonucu ivmeölçer elektroniğinin yeterince kararlı performans gösterdiği saptanmıştır.

Askeri ve havacılık uygulamalarında kullanılan elektrikli ve mekanik cihazların, sıcaklık aralığı dahil olmak üzere daha fazla çevresel değişkenliğe dayanması gerekebilir. Şimdiye kadar yapılan testler, oda sıcaklığında ivmeölçer okuma kartının taktik seviye kullanımına uygun olduğunu göstermektedir. Kullanım alanlarının gereği olarak, ivmeölçer okuma kartının yüksek ve düşük sıcaklıklarda doğru veri alıp işleyip iletmesi gerekmektedir.

Yüksek ve düşük sıcaklık testlerinin metodu MİL-STD-810G'den alınan sıcaklık profiline uygun olarak hazırlanmıştır. Bu testin gereği olarak 2 eksenli hareket benzetimcisi önceden -40 °C sıcaklığına set edilmiştir. Kabin sıcaklığı stabil hale geldikten sonra testlere başlanılmıştır. Oluşturulan test senaryosunun süresi 8 saat olarak belirlenmiştir. Sıcaklık ilk iki saat -40 °C'de koşullandırılmış daha sonra 6 saat boyunca, sıcaklık 0.33 °C/dk ile -40 °C'den + 71 °C'ye çıkarılmıştır. Bu sırada 2 eksenli hareket benzetimcisi z ekseninde 1G görececek şekilde konumlandırılmıştır. Benzetimci 6 saat boyunca üç eksen için de 8 konum testi 24 kez tekrar edilmiştir.

İvmeölçer okuma kartının oda sıcaklığında sabit kayma ortalama değerinin 0.369 mg olduğu, tekrarlanabilirlik değerinin ise 0.008 mg olduğu görülmüştür. Oda sıcaklığında yapılan testlerin sınır değerlerin oldukça içinde olduğu gözlemlendikten sonra ise sıcaklık ile kalibrasyon testlerine geçilmiş ve oradaki sonuçların da yine sınır değerler içinde kalması MATLAB/SIMULINK modeline bağlı kalınarak oluşturulan modelin taktik seviye kullanımlar açısından uygun olduğunu göstermiştir.



Şekil 7. Z eksini ivme verisi

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kompleks sistemlerin modellenmesi sistemin davranışının kavramak açısından tasarım aşamasında oldukça önemli bir yer teşkil etmektedir. Tasarım ve üretim sürecinin oldukça karmaşık, yeni ve maliyetli olması açısından ele aldığımız ivme ölçüm devresi ilk aşamada modellenerek tasarım süreci başlatılmıştır. Bu çalışmada öncelikle sensörün bütün yapısının nasıl çalıştığı analiz edilmiştir. Bu analizlerden yola çıkılarak sensörün okuma bloğu üzerinde kuramsal blok diyagramlar geliştirilmiştir. Bu blok diyagramlar ve kullanılan matematiksel modeller MATLAB/SIMULINK kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan modelin gerçeğe en yakın sonuçları vermesi açısından, gürültü kaynakları, sinyal gecikmeleri, bant genişlikleri gibi yukarıda bahsedilen etkenler modele eklenmiştir. MATLAB/ SIMULINK modelinde yapılan çalışmalar kapsamında sistemin çalışma frekansı, çözünürlüğü ve kullanılacak bileşenler dahil olmak üzere pek çok veri gerçekleştirme aşamasına geçmeden elde edilmiştir. Model üzerinde çalışma olanağı, baskı devre kartta görülecek geri dönüşü olmayan hataları saniyeler içinde bize sunmaktadır. Oluşturulan model sayesinde mekanik yapıda meydana gelecek değişiklikler ya da elektronik bileşenlerde yapılacak değişiklikleri sürekli kontrol etme ve tasarımı ona göre şekillendirme imkanı sağlamaktadır. Simülasyon sonuçlarının doğrulanması için oluşturulan modelin prototip çalışmaları yapmak, bu çalışma boyunca oluşturulan simülasyon modelinin çalıştığının kanıtlanması açısından oldukça önem teşkil etmiştir. Alınan sonuçlar incelendiğinde hem modelin hem de prototipin tutarlı sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın deneysel uygulamaları için gerekli donanımı sağlayan TÜBİTAK-SAGE'ye teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Y. Liang, X. Liu, C. Weiping, Z. Zhou, High resolution interface circuit for closed-loop accelerometer, IEEE Journal of Semiconductors, 32(4), May 2011. 10.1088/1674-4926/32/4/045005
- [2] İ. E. Ocak, H. Kulah, R. Kepenk, T. Akin, A high performance Σ - Δ Readout circuitry for μg resolution microaccelerometers» IEEE Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 64(2), 137-145, August 2010, 10.1007/s10470-009-9433-4
- [3] Y. Terzioglu, S. E. Alper, K. Azgin, T. Akin, A capacitive MEMS accelerometer readout with concurrent detection and feedback using discrete components, IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, July 2014, 10.1109/PLANS.2014.6851351
- [4] N. Yazdi, H. Kulah, K. Najafi, J. F. Dawson, M. D. Ganley, A. C. Martin, S. J. Porter ve D. W. P. Thomas, Precision readout circuits for capacitive microaccelerometers, IEEE Sensors, p. 28-31, 10.1109/ICSENS.2004.1426091
- [5] J.H. Lu, M. Inerowicz, S. Joo, J. K. Kwon, B. Jung, A Low-Power, Wide-Dynamic-Range Semi-Digital Universal Sensor Readout Circuit Using Pulsewidth Modulation, IEEE Sensors Journal Volume: 11 , Issue: 5 , May 2011 ,10.1109/JSEN.2010.2085430
- [6] O. Kaplan, Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 7(1): 37-48, 2019 10.29109/gujsc.475869
- [7] J.C Stiles, Quartz Accelerometer, U.S. Patent US3209601A
- [8] J. Soenab, A. Vodab, C. Condeminea, Controller design for a closed-loop micromachined accelerometer, Volume 15, Issue 1, (P)57-68, January 2007, 10.1109/InertialSensors.2016.7745674
- [9] C. M. Philip , "Practical Accelerometer Testing", Royal Aircraft Establishment, December 1998