

Yapay Sinir Ağı ile Kapasitif MEMS İvme Ölçerin Rezonans Frekansı Kestirimi

Estimation of Resonance Frequency of Capacitive MEMS Accelerometer by Artificial Neural Networks

Zehan KESİLMİŞ¹, Mutlu AVCI², Murat AKSOY¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Çukurova Üniversitesi

zkesilmis@cu.edu.tr, aksoy@cu.edu.tr

²Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

Çukurova Üniversitesi

mavci@cu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak Mikro Elektro Mekanik Sistem (MEMS) ivme ölçerin rezonans frekansı kestirimi yapılmıştır. Rezonans frekansı MEMS ivme ölçerin önemli bir tasarım kriteridir. Bu çalışma ile YSA'nın tasarımcıya önceden rezonans frekansı kestirimi ile büyük ölçüde zaman ve efor tasarrufu sağlanmıştır. YSA'nın eğitimi için kullanılacak verilerin üretimi SUGAR programı ile elde edilmiştir. Geliştirilen YSA, girilen üretim parametreleri için MEMS ivme ölçerin elektriksel ve mekanik cevabını başarılı bir şekilde tahmin etmektedir.

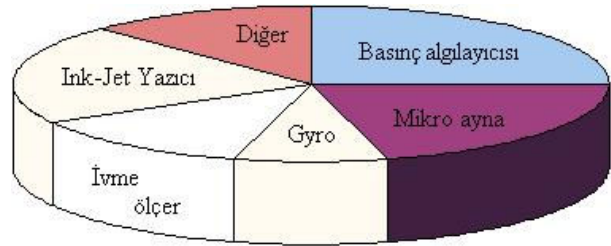
Abstract

In this work, artificial neural network based resonance frequency estimation of MEMS accelerometer is done. Resonance frequency is an important design parameter of MEMS accelerometer. By this work, great effort and time reduction advantages for the designer are proposed. Artificial neural network is trained with the data obtained in SUGAR environment. Developed ANN predicted mechanical and electrical responses of MEMS accelerometer successfully for the given design parameters.

1. Giriş

MEMS aygıtların mevcut tümdevre prosesleriyle üretilebilmeleri, üretim maliyetlerinin düşük olması, elektronik devrelerle beraber tasarlanabilmeleri gibi avantajları vardır. Temel MEMS aygıtları, eyleyiciler ve algılayıcılar olarak sınıflanabilir [1].

Üretilen MEMS aygıtların 2005 yılı pazar payları şekil-1'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi en büyük pazar payını yazıcı başlığı ile projeksiyon cihazlarında kullanılan mikro aynalar almaktadır. Üretilen algılayıcıların %90'ı ise otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [2].



Şekil 1: MEMS ürünlerin 2005 yılı pazar payları

Benzetim programları sayesinde amaçlanan ürün özelliklerine ulaşmak hızlı ve düşük maliyetli olmaktadır. Bilgisayar destekli tasarım programları kullanarak tasarım süresini kısaltmakta ve maliyetleri düşürmek mümkündür [3].

Sonlu elemanlar yöntemi kullanan MEMS benzetim programları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4]. Bu tür benzetim programları sayesinde gerçekleştirilen MEMS elemanlarına oldukça yakın benzetim sonuçları elde edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi tabanlı geliştirilen benzetim yazılımlarında tasarlanan MEMS aygıtın geometrik yapısı değiştirildiğinde sonlu eleman ağ yapısının yeniden oluşturulması gerekmektedir. Böylece benzetim sonuçlarının gözlemlenebilmesi çokça vakit almaktadır. Literatürde sonlu elemanlar yönteminin daha kısa sürede sonuç üretmesi için yapılmış çalışmalar vardır [5].

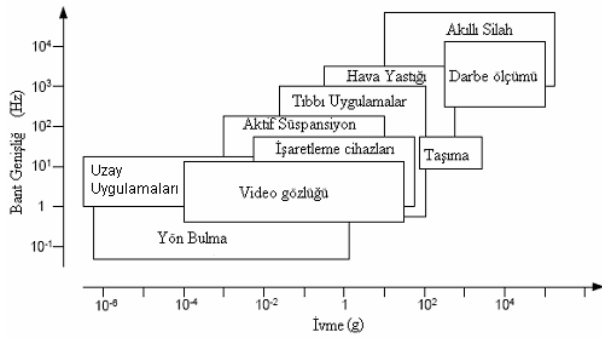
SUGAR, Berkeley üniversitesi tarafından geliştirilmiş MEMS benzetim programıdır. MATLAB® ortamında çalışmaktadır.

Bu çalışmada, kontrol devresi içermeyen MEMS ivmeölçerin, SUGAR ile çeşitli tasarım parametre değişimlerine göre çıkış elektriksel ve mekanik karakteristiği incelenmiştir. Elde edilen veriler de YSA eğitiminde kullanılmıştır. Böylece YSA ile tasarım olmaksızın tasarım parametrelerinin elektriksel ve mekanik çıkışa olan etkileri kestirilmiştir. Ticari paketlerde bulunan MEMS ivmeölçerler tümleşik yapıları çeşitli kontrol üniteleri içermektedir. Bu nedenle kontrol devresi içermeyen MEMS ivmeölçer için deneysel veri elde etmek, ancak MEMS üretimini gerçekleştirebilecek bir laboratuvar ortamında mümkün

olmaktadır. Bunun yerine deneysel veriler ile desteklenen benzetim yazılımlarında kullanılan MEMS eleman modelleri, bilimsel çalışmalar için deneysel gerçeklemlerle yaklaşık eş karakteristiğe sahip, kabul edilir yaklaşımlardır. Bu yapılarla gerçekleştirilen genel amaçlı model yaklaşımları ve bilimsel geliştirmeler özel MEMS proseslerine adapte edilebilmektedir. Bu nedenle SUGAR ile elde edilen veriler YSA eğitimi ve testi için kullanılmıştır. Geliştirilen YSA'nın tasarımcının işlemlerini kolaylaştırması amaçlanmıştır.

2. MEMS ivmeölçer

İvmeölçerler ivmelenmeyi elektriksel işarete çeviren algılayıcılardır. MEMS ivmeölçerler, otomobillerin fren sistemlerinde, hava yastıklarında, bilgisayarların sabit disklerinde, deprem ölçüm istasyonlarında, tıp alanında parkinson gibi hastalıkların incelenmesinde ve oyun konsollarında sıklıkla kullanılmaktadır [6]. MEMS ivme ölçerlerin ticari potansiyeli oldukça yüksektir. Şekil-2'de MEMS İvme ölçerinin kullanım alanları ivme ölçüm aralıklarına ve bant genişliklerine göre verilmiştir.



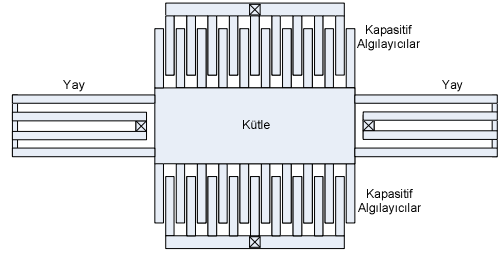
Şekil 2: MEMS İvme ölçerinin kullanım alanlarının bant genişliğine ve ivme aralığına göre dağılım grafiği

MEMS ivme ölçerler ivmeyi algılama yöntemlerine göre yedi gruba ayrılabilirler: Piezoresistif, Kapasitif, Piezoelektrik, Optik, Termal, Rezonans ve tünelleme akımlı.

En çok üretilen MEMS ivme ölçerler piezoresistif ve kapasitif tür ivme ölçerdir.

Kapasitif algılayıcıların diğer algılayıcı tiplerine göre basit yapıda olmaları ve üretim maliyetlerinin düşük olmaları gibi avantajları vardır. Kapasitif algılayıcılar hassas, düşük güç tüketen, ısı bağımlılığı düşük algılayıcılardır. Düşük maliyetleri ve yüksek performansları nedeniyle çok tercih edilmektedirler.

Yapısal olarak kapasitif MEMS ivmeölçer, tabana yayla bağlı hareket edebilir bir kütlelen oluşmaktadır. Uygulanan kuvvetle söz konusu kütle normal konumundan sapar. Şekil-3'de böyle bir ivme ölçer verilmiştir. Merkezdeki kütlelen yer değiştirmesi sistemin ivmesiyle orantılıdır [7].



Şekil 3: Kapasitif MEMS İvme ölçer

F kuvvetine maruz kalan m kütledeki cismin yer değiştirmesi denklem (1)'de frekans domeninde verilmiştir. Denklem (1)'de k mekanik yay sabitini, b damping sabitini a ölçülecek ivmeyi x ise kütlelen yer değiştirmesini temsil etmektedir.

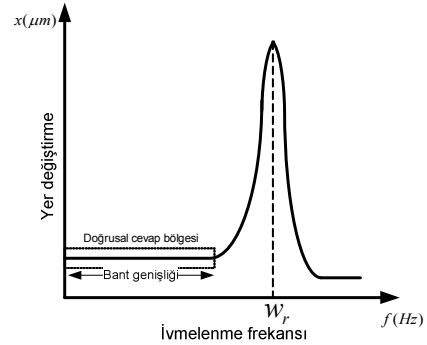
$$\frac{x(s)}{a(s)} = \frac{1}{s^2 + s \frac{b}{m} + \frac{k}{m}} \quad (1)$$

sistemin rezonans frekansı denklem (2)'de verilmiştir.

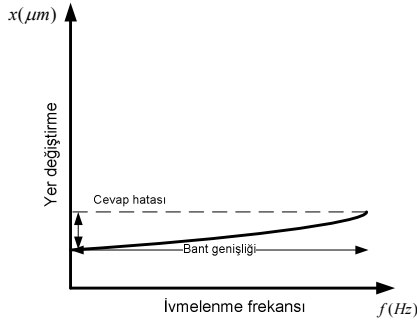
$$w_r = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{w_r m}{b} \quad (3)$$

Şekil-4'de frekans değişimine karşılık yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil-4'de efektif bant genişliği olarak tanımlanan yaklaşık doğrusal bir bölge vardır. Bu bölgenin yakından gösterimi şekil-5'de verilmiştir. Efektif bant genişliği ve cevap hatası rezonans frekansına bağlı önemli bir tasarım parametresidir [8].



Şekil 4: İvme ölçerinin ivmelenme frekansına bağlı yer değiştirme grafiği



Şekil 5: İvme ölçerin ivmelenme frekansına bağlı yer değiştirme grafiği (yakından gösterim)

Bant genişliği içinde, ivmeye karşılık yüksek yer değiştirme isteniyorsa rezonans frekansı mümkün olduğu kadar küçük seçilmelidir. Rezonans frekansı ile yer değiştirme arasındaki ilişki denklem (4)'de verilmiştir. Görüldüğü gibi rezonans frekansı önemli bir tasarım kısıtasıdır [8].

$$X = \frac{a}{\omega_r^2} \text{ (m)} \quad (4)$$

3. Benzetim çalışmaları

Tablo-1'de bu çalışmada incelenen parametreler verilmiştir. Tasarım ve proses parametreleri tabloda verilen aralıklarda değiştirilmiştir. Parametre değişimine göre ivme ölçerin DC ve AC çıkış karakteristikleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler MATLAB® ortamında oluşturulan yapay sinir ağı eğitiminde kullanılmıştır.

Tablo 1: İncelenen tasarım parametreleri

Değişken	Sembol	Birimi	En küçük	En büyük
PolySi kalınlığı	B	µm	2	4
Çubuk boyu	L	µm	100	300
Çubuk eni	h	µm	2	4
Merkez kütle alanı	A	µm ²	10000	90000
Kapasitif algılayıcı sayısı	-	-	10	50

4. Yapay Sinir Ağı ve Eğitimi

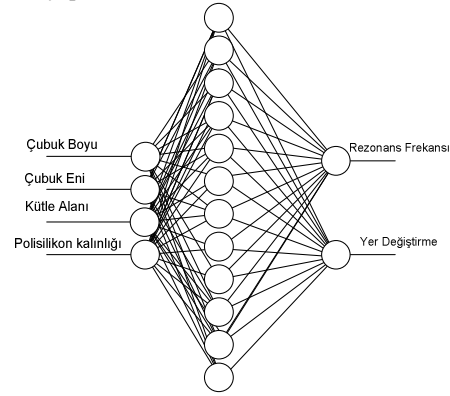
Yapay sinir ağları, canlıların biyolojik sinir ağlarını taklit eden matematik modellerdir ve yapay nöronların birbirine değişik ağ topolojilerinde bağlanmasından oluşurlar [9].

YSA'lar fonksiyon yaklaşımı yapma, regresyon, sınıflama, veri işleme, işaret işleme gibi geniş kullanım alanları bulmaktadır. YSA'ların öne çıkan özellikleri şunlardır: doğrusal olmayışları, girişlerle çıkışlar arasında ilişki kurabilmeleri, VLSI teknolojisiyle üretilebilmeleri,

uyarlanabilir olmaları, hataya karşı toleranslarının yüksek olmaları [10].

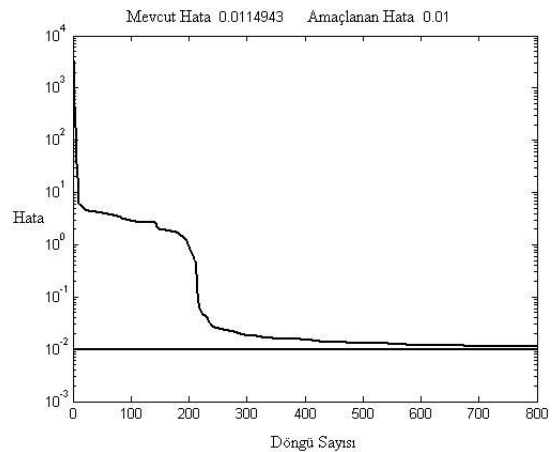
Başarılı bir şekilde eğitilmiş bir YSA eğitim kümesi dışındaki problemlere de yaklaşık sonuçlar üretmektedir. YSA'ların kendi kendine öğrenebilme özelliği problem çözümlerinde karmaşık ve zor matematik analizlerin kullanılmasını gereksiz kılar. Gizli katmanlar için yarı doğrusal sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanımı YSA'ların doğrusal olmayan kontrol işlerini başarıyla yapabildiğini sağlamaktadır [11].

YSA'nın doğrusal olmayan problemlere en yakın cevapları verebilme özelliği bu çalışmanın ana hareket noktasını oluşturmaktadır. Böylece istenilen özellikleri sağlayacak bir ivme ölçer tasarımı karmaşık ve uzun hesaplamalara girilmeden yapılabilmektedir.



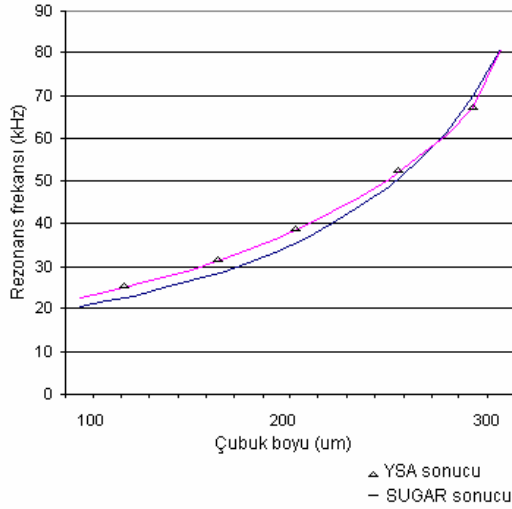
Şekil 6: Çok katmanlı yapay sinir ağı

Bu çalışmada YSA yapısı olarak çok katmanlı ağ yapısı seçilmiştir. Ağ yapısı bir gizli katman ve bu katmanda bulunan 12 nörondan oluşmaktadır. Ağın eğitimi için ise hatanın geri yayılımı yöntemi kullanılmıştır. Ağ yapısı ve ağın giriş-çıkışları şekil-6'de verilmiştir. Şekil-7'de geliştirilen yapay sinir ağının eğitim hata grafiği verilmiştir. Grafikte yatay eksen eğitim döngü sayısını dikey eksen YSA'nın ürettiği sonuçla beklenen sonuç arasındaki görülmektedir. Eğitim sonunda hedeflenen hata 0.01'dir.



Şekil 7: MATLAB YSA eğitim başarı grafiği

SUGAR modeli üzerinde tablo-1’de verilen tasarım parametreleri değiştirilerek çeşitli benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerin sonuçlarından 200 tanesi YSA eğitim verileri olacak şekilde düzenlenmiştir. MATLAB® ortamında oluşturulan YSA eğitilmiş ve sonuçlar modelden elde edilen yeni test verileri ile karşılaştırılmıştır. YSA başarısının en yüksek olduğu noktaya kadar YSA yapısı üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. En iyi sonucun bir gizli katman ve bu katmanda 12 nöron olacak şekilde düzenlenmiş YSA’dan alındığı görülmüştür. En yüksek başarılı YSA topolojisinin test sonuçları yay boyunun rezonans frekansına etkisini gösteren Şekil-8’de verilmiştir. Burada SUGAR ve YSA’nın sonuçları aynı grafik üzerinde eş eksenli yer almaktadır.



Şekil 8: Yay boyunun rezonans frekansına etkisi

5. Sonuçlar

MEMS ivme ölçer tasarımı için önemli parametrelerden ikisi olan rezonans frekansı kestirimi ve ilişkili olduğu yer değiştirme parametresi YSA tabanlı bir kestirim ile elde edilmiştir. Böylece tasarımcının deneyimi ve benzetim ortamında değişen denemeleri ile elde etmesi gereken rezonans frekansı ve yer değiştirme parametreleri, YSA ile çok hızlı ve benzetim zamanı harcamaksızın kestirilmiştir. Eğitilen YSA modeline giriş olarak tasarlanacak MEMS ivmeölçerin özellikleri verilmiştir. YSA modeli girilen parametreler için ivme ölçerin mekanik ve elektriksel karakteristiğini başarılı bir şekilde tahmin edebilmektedir. Böylece tasarımcının geliştirilen YSA tabanlı modeli kullanarak benzetim olmaksızın MEMS ivmeölçerin rezonans frekansı ve yer değiştirme karakteristiğini bulması ve daha hızlı tasarım yapması mümkün olabilmektedir.

6. Kaynaklar

- [1] Beeby, S. Ensell, G. Kraft, M. White N. “MEMS Mechanical Sensors”, Archtech House, 2004
- [2] Tanaka, M. “An industrial and applied review of new MEMS devices features” Microelectronic Engineering, 2007, 1341–1344

- [3] Wachutka, G. “The art of modelling coupled-field effects in microdevices and microsystems”, International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, 1999, 697-703.
- [4] P. Krishna Rao, P.S. Srinivas Babu, “Design of Two Beam Capacitive Micromachined Acceleration Sensor and Its Displacement and Stress Analysis” Asian J. Exp. Sci., Vol. 22, No. 3, 2008, 351-356
- [5] Kolchuzhin, V. Mehner, J. “Parametric Finite Element Analysis for Reduced Order Modeling of MEMS” 7th. Int. Conf. on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2006
- [6] Gad-el-Hak, M. “The MEMS Handbook”, CRC press Taylor and Francis Group, 2006, Boca Raton.
- [7] Li, G. Tseng, A. A. “Low Stress Packaging of a Micromachined Accelerometer”, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 24, No. 1, 2001, 18-24
- [8] Erişmiş, M. “MEMS accelerometers and gyroscopes for inertial measurement units” ODTÜ, Ankara, 2004
- [9] Lee, W.F. “Electrical modelling of MEMS sensor for integrated accelerometer application”, Electron Devices Meeting, 1999, 88-91.
- [10] Bose, N. Liang, P. “Neural Network Fundamentals with graphs, algorithms and applications”, McGraw-Hil, 1996
- [11] Haykin S. “Neural Network A Comprehensive Foundation”, Macmillian college publishing, 1994, New York.