

YARI İLETKEN İVME ALGILAYICISI İLE MİKRODENETLEYİCİLİ TİTREŞİM ANALİZÖRÜ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Şeref Naci ENGİN¹Mehmet HALICI²Emin Murat ESİN³¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh. Bölümü²Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik Müh. Bölümü³Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Bilgisayar Müh. Bölümü¹e-posta: nengin@yildiz.edu.tr²e-posta: halicimehmet@ixir.com³e-posta: emesin@bilmuh.gyte.edu.tr

Anahtar sözcükler: Titreşim Analizi, İvme Algılayıcısı (Sensörü), Mikrodenetleyici, Veri Toplama Kartı, FFT

ÖZET

Bu çalışmada titreşim analizlerinin yapılabilmesi için bir veri toplama ve izleme sistemi (DAQ) tasarlanarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen mikrodenetleyicili devrede yarı iletken ivme sensörü kullanılmıştır. Bu sistemin maliyetinin düşük, kurulumunun kolay olmasını sağlamıştır. Veri aktarımının RS232 seri portu üzerinden gerçekleşmesi, sistemin başka sistemlere uyumluluğunu ve dolayısıyla farklı amaçlar için kullanımını mümkün kılar. Sistemin test edilebilmesi amacıyla gerçek titreşim verilerinin toplanabilmesi için titreşim yapan bir deney seti kurulmuştur. Veri toplama ve izleme sistemi kullanılarak deney setinden ölçülen sayısal titreşim verileri PC ortamında bir metin dosyasına kaydedilmiştir. Son olarak bu veriler MATLAB™ programına taşınarak zaman ve frekans analizleri yapılmıştır. Gözlemler ve sonuçlar yorumlanmıştır.

1. GİRİŞ

Makine teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, titreşimin izolasyonu ve azaltılması makine tasarımının kaçınılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bu gelişim, titreşimin daha doğru ölçümüne ve analizine olan ihtiyacı artırmıştır. Esasen uygulamalarda titreşimden tamamen kurtulmak mümkün değildir. İmalat toleranslarının ve açıklıklarının dinamik etkilerinden dolayı titreşimler meydana gelir. Makine parçalarından birbirine sürtünen yüzeyler, karşılıklı dönen parçalar arasındaki dengesiz yükler, vs. birer titreşim sebebidir. Bazen küçük ve önemsiz titreşimler, diğer yapısal parçaların rezonans frekanslarını tahrik ederek büyük titreşimlere ve gürültü kaynaklarına sebep olabilmektedir [1]. Ayrıca çeşitli endüstriyel ürünlerin, titreşim testlerine tabi tutulması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen titreşim test cihazlarında, seviyesi kontrol edilebilen bir titreşim enerjisi, ürünlere veya yan parçalarına uygulanır. Ürünün titreşime karşı fiziksel ve fonksiyonel cevabı incelenerek, titreşimin çok olduğu

ortamlara ne derece dayanıklı olduğu belirlenmeye çalışılır [1].

Titreşimin ölçülmesi için yaygın olarak ivme algılayıcıları kullanılmaktadır. Muhtelif teknolojiler kullanılarak üretilmiş çok çeşitli ivme algılayıcısı mevcuttur. Bu çalışmada geliştirilen veri toplama sisteminde, Analog Devices firmasının MEMS (Micro Electro Mechanical System) teknolojisi ile ürettiği ADXL202 ivme sensörü kullanılmıştır [2,3].

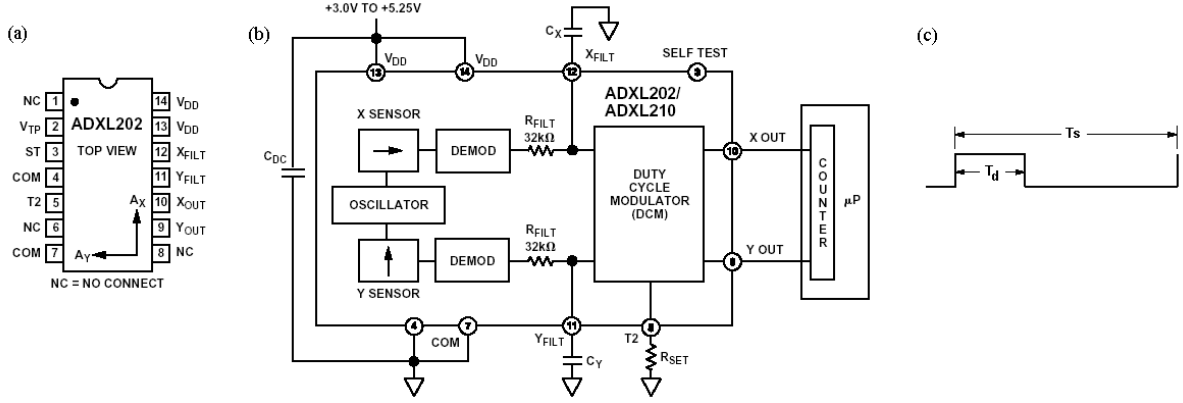
2. ADXL202 İVME ALGILAYICISI

ADXL202, $\pm 2g$ ölçüm aralığına sahip, x ve y eksenlerindeki ivmeleri ölçen, kapasitif, yarı iletken bir ivme sensörüdür. ADXL202 yapısı itibarı ile hem dinamik ivmeleri (titreşim gibi), hem statik ivmeleri (yer çekim ivmesi) ölçebilmektedir. ADXL202 yüzey montajlı entegre kılıfında üretilmiştir. Bacak bağlantıları ve işlevsel öbek çizimi Şekil 1’de verilmiştir [2].

ADXL202 hem analog hem de sayısal çıkış verir. x ve y eksenleri sensörlerinden alınan işaretler bir demodülatörden geçirildikten sonra ADXL202’nin analog çıkışını oluşturur. Bu analog çıkış ivme ile doğrusal orantılı bir gerilim olup bir ADC vasıtası ile okunabilir. Analog çıkış uçları aynı zamanda işaretin bant genişliğini sınırlandırmak için de kullanılır. Bu uçlara birer kapasite bağlanarak okunacak ivme değerlerinin bant genişliği, RC tipi bir AGF (Alçak Geçiren Filtre) yapısı ile sınırlandırılabilir.

ADXL202 ivme sensörünün beyaz Gauss gürültüsü ile modellenen bir gürültü karakteristiği mevcuttur ve gürültünün spektral yoğunluğu $500 \mu g / \sqrt{Hz}$ olarak verilmiştir. Beyaz Gauss gürültüsü her frekansa eşit miktarda dağıldığından, gürültü genliği ile işaretin bant genişliği arasında bir tercih durumu söz konusudur. ADXL202’nin bant genişliği, AGF’nin üst kesim frekansına eşit olup aşağıdaki gibi verilir [2]:

$$BW = F_H = 5\mu F / C_{(x,y)} \quad (1)$$



Şekil 1. ADXL202'nin (a) bacak bağlantıları, (b) işlevsel öbek çizimi, (c) kare dalga çıkışı

Bant genişliği sınırlandırılan analog işaret daha sonra DCM'den (Duty Cycle Modulator) geçirilerek sayısal çıkış elde edilir. Sayısal çıkış, darbe boşluk oranı (Duty Cycle) modüle edilmiş bir kare dalga işaretidir. Bu çıkış, ek bir lojik devreye ihtiyaç olmadan bir mikrodenetleyici vasıtası ile okunabilir. Darbe boşluk oranı modüle edilmiş işaretin periyodu, T2 ucuna bağlanan R_{SET} direnci ile 0.5 ms ile 10 ms arasında ayarlanabilir. Bu periyot aynı zamanda okunan ivme değerlerinin örnekleme periyodu olup aşağıdaki gibi verilmiştir [2]:

$$T_s = R_{SET}(\Omega) / 125M\Omega \quad (2)$$

Bu örnekleme periyodu ile, sınırlanan bant genişliği arasında bir ilişki vardır. Teorik olarak örnekleme frekansının bant genişliğinin en az 2 katı olması gerektiği Nyquist tarafından belirtilmiştir. Fakat uygulamada bu örnekleme frekansı yeterli olmamaktadır. Düzgün ve iyi bir sonuç elde etmek için örnekleme frekansının bant genişliğinin en az 10 katı olması gerektiği belirtilmiştir [2].

Şekil 1.c'de ADXL202'nin XOUT ve YOUT uçlarından verdiği kare dalga çıkışı gösterilmiştir. Burada T_d darbe süresini, T_s ise örnekleme periyodunu gösterir. İvmenin darbe boşluk oranına bağlı ifadesi ideal durum için aşağıdaki gibi verilir [2] :

$$A = (T_d / T_s - 0.5) / \%12.5 \quad (3)$$

Buradaki ivme değeri olan A , g (yerçekimi ivmesi) türündendir. $0g$ değerinde ideal durumda darbe boşluk oranı %50 olmaktadır. Bu değer *offset* değeridir. Aynı zamanda $1g$ 'lik bir ivme değişimi ideal durumda darbe boşluk oranında %12.5'luk bir sapmaya sebep olmaktadır. Bu sapma miktarına ise *duyarlılık* denilir. Offset ve duyarlılığın gerçek değerleri hiçbir zaman ideal değerler ile uyuşmadığından gerçek durumda ivmenin darbe boşluk oranına bağlı ifadesi şu şekilde verilir:

$$A = (T_d / T_s - \text{Offset}) / \text{Duyarlılık} \quad (4)$$

Ayrıca ADXL202'nin kaydettiği ivme değerleri ve $0g$ offseti ortam sıcaklığı ile değişmektedir. Sıcaklık

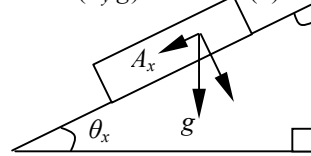
değişimi $2 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ olarak verilmiştir [2]. Bu yüzden algılayıcının offset ve duyarlılık değerlerinin kullanım sırasında bilinmesi gerekmektedir. Bunun için sensörün zaman zaman kalibrasyonu yapılır.

3. ADXL202 İLE EĞİMİN VE AÇISAL HIZIN ÖLÇÜLMESİ

ADXL202'nin, dinamik ivmenin yanı sıra statik ivmeyi, yani üzerine etkiyen yerçekimi ivmesini de algılayabilmesi, bulunduğu yüzeyin eğiminin ölçülmesini mümkün kılar. Sensör yer yüzeyine paralel dururken x ve y yönünde etkiyen ivme 0 dir. x veya y eksenini Şekil 2'deki gibi yer düzlemi ile bir θ_x (*pitch*) veya θ_y (*roll*) açısı yapıyorsa bu açılar aşağıdaki bağıntılarla hesaplanabilir [2,3]:

$$\theta_x = \arcsin(A_x/g) \quad (5)$$

$$\theta_y = \arcsin(A_y/g) \quad (6)$$



Şekil 2. ADXL202 ile eğim ölçülmesi

Buradaki θ_x ve θ_y açıları Euler açılarıdır. Bu açılardan faydalanarak düzgün dairesel hareket veya basit harmonik hareket yapan bir cismin açısal hızına türev işlemiyle ulaşılabilir. Ayrık zamanlı sayısal veriler üzerinde düşünersek, n . örnek için açısal hızlar

$$\omega_x[n] = (\theta_x[n] - \theta_x[n-1]) / T_s \quad (7)$$

$$\omega_y[n] = (\theta_y[n] - \theta_y[n-1]) / T_s \quad (8)$$

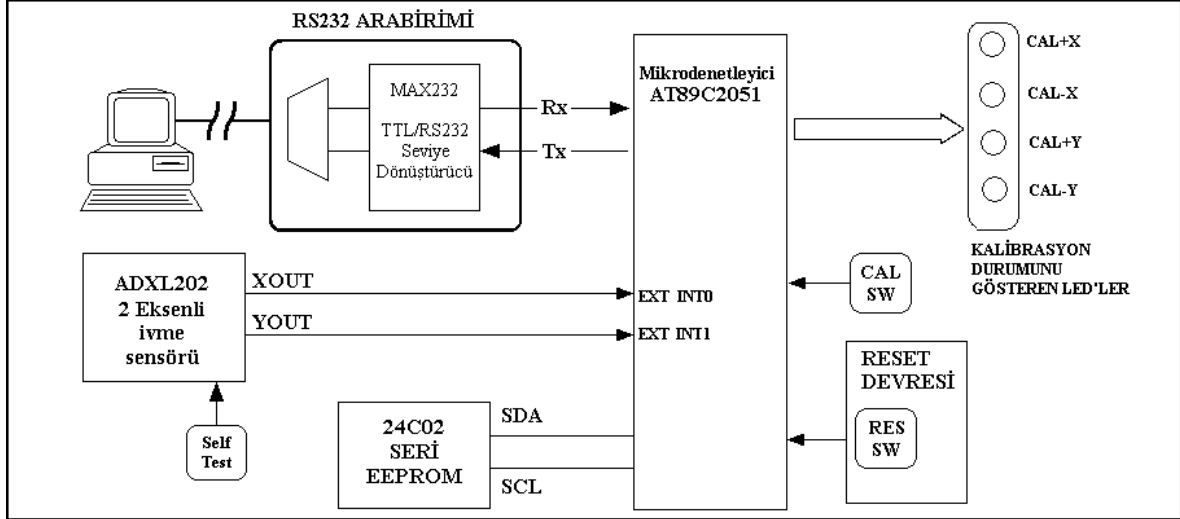
denklemleriyle hesaplanabilir.

4. TASARIM

Veri toplama ve izleme sisteminin tasarımının temel olarak üç parçadan oluşması düşünülmüştür. Bunlar;

- mikrodenetleyicili donanım tasarımı,
- mikrodenetleyicinin assember yazılımı, ve
- PC grafik kullanıcı ara yüzü yazılımıdır.

Tasarlanan sistemin öbek çizimi Şekil 3'de verilmiştir.



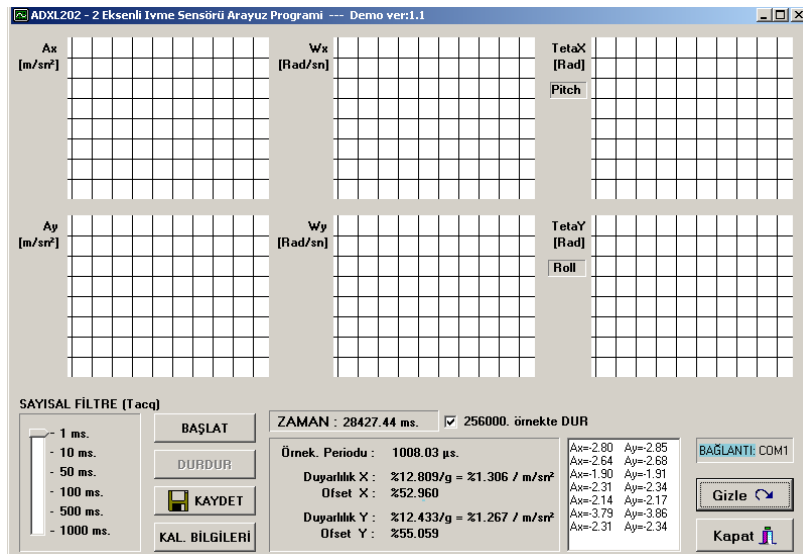
Şekil 3. Tasarlanan sistemin öbek çizimi

Tasarlanan veri toplama kartı mikrodenetleyici tabanlı olup, Atmel firmasının ürettiği 8051 tabanlı AT89C2051 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır [4]. Mikrodenetleyici, ADXL202'nin sayısal çıkışından ivme verilerini okuyarak, RS232 seri arabirimi üzerinden PC'ye gönderir. Veri toplama kartı 57600 bps hızında ve 8N1 formatında PC ile seri haberleşme yapmaktadır. ADXL202 mikrodenetleyicinin harici kesme girişlerine bağlanmıştır. Devrede ayrıca ADXL202'nin kalibrasyonu için bir düğme (CAL SW) bulunmaktadır. Kalibrasyon durumunu izlemek için devreye LED'ler bağlanmıştır. Ayrıca kalibrasyon verilerini saklamak için bir kalıcı belleğe ihtiyaç duyulmuş, bu işlem için 24C02 seri EEPROM entegresi seçilmiştir. Devrede bulunan MAX232 entegresi, TTL seviyeyi, RS232 sinyal seviyelerine çevirmekte kullanılır. Devredeki "RES SW" butonu mikrodenetleyiciyi *resetter*. "Self Test" butonu ise ADXL202'yi sınamak için kullanılır. Geliştirilen kartta, gürültüyü azaltmak için bant genişliği sınırlandırması x ve y eksenleri için 100Hz olarak

seçilmiştir. Örnekleme aralığı ve sıklığı ise $T_s=1\text{ms}$ ve $f_s=1\text{kHz}$ olarak seçilmiştir. Buna göre geliştirilen veri toplama sistemi 0-100 Hz arasındaki titreşim işaretlerinin ölçümünde kullanılabilir.

Darbe boşluk oranının okunması mikrodenetleyicinin kesme girişleri ve zamanlayıcıları kullanılarak yapılmaktadır. Mikrodenetleyicinin görevi, bir taraftan darbe sürelerini okuyarak, diğer taraftan bu okuduğu değerleri, gerçek zamanlı olarak seri porttan PC'ye göndermektir. Mikrodenetleyicinin hız kısıtlamalarından dolayı 4,5,6,7,8 denklemlerindeki hesaplamaları yapmak, PC üzerinde çalışan ara yüz programına yüklenmiştir.

Şekil 4'de, C++ Builder 5.0'da geliştirilen PC grafik kullanıcı ara yüzünün genel biçimi gösterilmiştir. KAL.BİLGİLERİ düğmesine basıldığında kart üzerindeki EEPROM'da bulunan kalibrasyon bilgileri okunur ve bir dosyaya yazılır. BAŞLAT butonuna basıldığı andan itibaren, veri toplama kartı ivme sensöründen ölçülen verileri PC'ye gönderir.



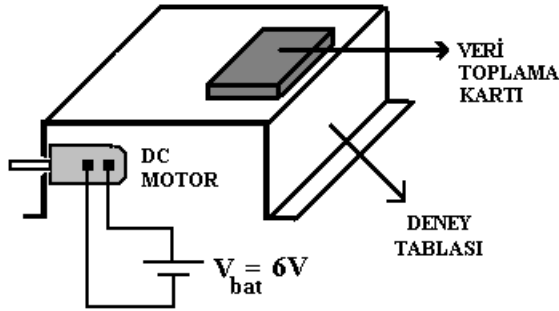
Şekil 4. PC Grafik kullanıcı ara yüzü genel görünümü

Ara yüz programı X ve Y eksenlerine ait ivme, açılal hız ve eğim bilgilerini 4,5,6,7,8 denklemlerinden hesap ederek osilaskop ekranlarına çizdirir. Hesaplanan bu değerler, hafızada bir dizide tutulur. STOP butonuna basıldığında seri iletişim sona erer. Peşinden KAYDET butonuna basılırsa, hafızadaki bu değerler bir metin dosyasına matris formatında kaydedilir, böylelikle bu verilerin MATLAB ortamına kolayca taşınması amaçlanmıştır.

Programa ayrıca bir sayısal filtre özelliği ilave edilmiş, böylelikle işarete karışan gürültünün ortalaması alınarak süzülmesi amaçlanmıştır. Sol alt köşede bulunan "TrackBar" kutusuyla kaç örneğin ortalamasının alınacağı belirlenir. Bu özelliği kullanmanın sakıncası işareti yavaşlatıyor olmasıdır. İşaretin değişimi hızlı ise yani işaret yüksek frekanslı bileşenler içeriyorsa, ortalama almak işaretin kendisini de bozacaktır. Fakat ölçülecek işaretin frekansı düşük ise, ölçüm doğruluğunu artırmak için bu özellik kullanılabilir.

5. TEST VE DENEYLER

Sistemin test edilebilmesi için Şekil 5'de verilen deney seti oluşturulmuş, geliştirilen veri toplama kartı deney tablası üzerine sabitlenmiştir. Deney tablasına 24V'luk bir DC motor yerleştirilmiştir.

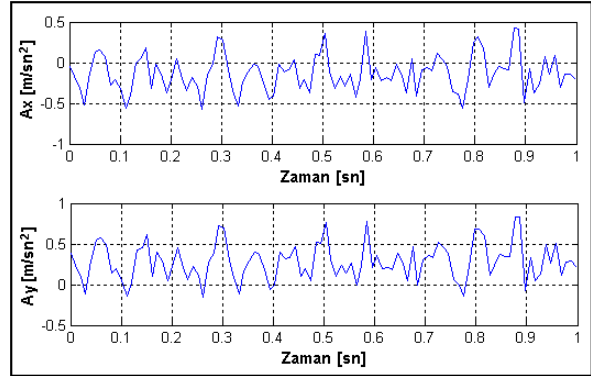


Şekil 5. Kurulan Deney Seti

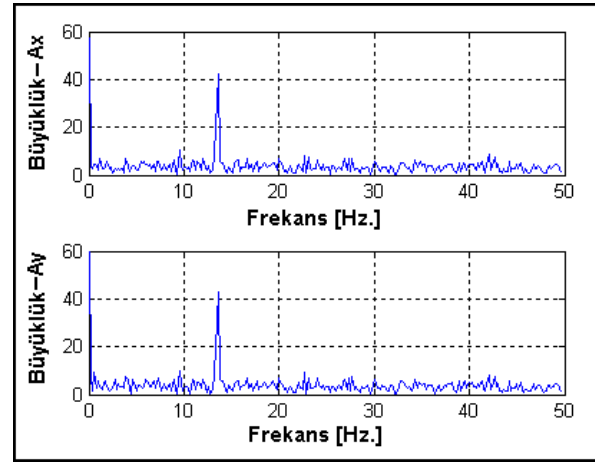
Motor miline herhangi bir yük bağlanmamış ve motor 6V'luk bir batarya ile çalıştırılmıştır. Böylelikle gürültü işareti seviyelerinde küçük genlikli bir titreşim oluşturularak, veri toplama sisteminin ölçüm hassasiyetinin ortaya çıkartılması amaçlanmıştır.

Kullanıcı ara yüz programı ile bir metin dosyasına kaydedilen titreşim verileri MATLAB ortamına taşınmıştır. Şekil 6'da A_x ve A_y ivmelerinin 0-1s zaman aralığındaki değişimi çizdirilmiştir. Motor milinin düzgün dairesel hareket yapması sebebi ile bu grafiklerin sinüzoidal olması beklenirken, işaretin gürültü ile karışmasından dolayı bozulduğu gözlenmektedir. İşaret ile gürültüyü birbirinden ayırmak için sayısal verilerin Fourier dönüşümü (FFT) katsayıları hesap edilerek frekans spektrumu çıkartılmış ve Şekil 7'de çizdirilmiştir. Frekans spektrumunda gerçek işaret ile gürültü işaretinin birbirinden ayrıldığı görülmektedir. $f=13.5\text{Hz}$ frekansında bulunan büyük genlikli darbecik, veri toplama kartından elde edilen titreşim işaretinin bu frekansta belirgin bir sinüzoidal değişim içerdiğini

göstermektedir. Bu frekansın beklendiği gibi, motor milinin açılal hızına ($\approx 85\text{rad/s}$) veya devir sayısına ($\approx 810\text{dev/dk}$) karşılık geldiği saptanmıştır.



Şekil 6. A_x ve A_y değerlerinin 0-1sn zaman aralığındaki değişimi



Şekil 7. Titreşim ivmelerinin frekans spektrumu

SONUÇLAR

Bu çalışmada düşük maliyetli bir titreşim analizörü önerilmiştir. Geliştirilen sistem ivme ile beraber yüzey eğimini ve açılal hızı da ölçebileceğinden çok amaçlı bir ölçüm ve test cihazı olarak kullanılabilir. Gerçeklenen tasarım, 0-100 Hz frekans aralığındaki titreşim işaretlerini ölçmektedir. Ölçüm aralığı yaklaşık $\pm 20\text{m/sn}^2$ 'dir. Kullanılan mikrodenetleyicinin hız ve donanım kısıtlamalarından dolayı, geliştirilen ölçüm sistemi $\pm 0.5\text{ m/sn}^2$ lik bir hata toleransına sahiptir. Daha hızlı veya daha gelişmiş mikrodenetleyiciler kullanılarak, bu hata azaltılabilir. İleriki çalışmalarda bu veri toplama sisteminin makine durum izleme ve arıza tanımda kullanılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Brüel & Kjaer, Measuring Vibration, Revision September 1982
- [2] Analog Devices Inc., ADXL202/210 Datasheet, Rev.B, 1999
- [3] iMEMS, Accelerometers Technical Library, <http://www.analog.com/technology/mems/accelerometers/library.html>
- [4] ATMEL Corp., 8051 Flash Microcontroller Data Book, December 1997